

Trabajo Fin de Máster Máster Universitario en Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos

Análisis del efecto de los agentes marinos en la regeneración de playas

Autor: Joaquín Decena Gamero

Tutor: Alejandro López Ruiz

**Dpto. de Ingeniería Aeroespacial y Mecánica de Fluidos
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla**

Sevilla, 2019



Trabajo Fin de Máster
Máster Universitario en Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos

Análisis del efecto de los agentes marinos en la regeneración de playas

Autor:

Joaquín Decena Gamero

Tutor:

Alejandro López Ruiz

Profesor Ayudante Doctor

Dpto. de Ingeniería Aeroespacial y Mecánica de Fluidos
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2019

Trabajo Fin de Máster: Análisis del efecto de los agentes marinos en la regeneración de playas

Autor: Joaquín Decena Gamero

Tutor: Alejandro López Ruiz

El tribunal nombrado para juzgar el trabajo arriba indicado, compuesto por los siguientes profesores:

Presidente:

Vocal/es:

Secretario:

acuerdan otorgarle la calificación de:

El Secretario del Tribunal

Fecha:

Agradecimientos

Quiero agradecer a mi tutor Alejandro López Ruiz la oportunidad que me dio de poder realizar este trabajo y el apoyo que me mostró en todo momento. Sus conocimientos, calidad humana y disponibilidad son algo que valoro enormemente. Gracias.

También me gustaría dedicar este trabajo a mis padres, por la ilusión que siempre pusieron en mí y permitirme que solo tuviese que centrarme en aprender.

Finalmente agradecer a mi hermana y mi sobrino todos esos momentos divertidos, su apoyo incondicional y por estar siempre dispuestos a ayudarme.

*Joaquín Decena Gamero
Sevilla, 2019*

Resumen

En la actualidad, casi la mitad de la población mundial vive en zonas costeras. Sin embargo, el 70% de las playas del mundo están sufriendo erosión. Además, el continuo crecimiento de la población y las industrias que ha tenido lugar cerca de la costa durante décadas, junto con el cambio climático y el consecuente incremento del nivel del mar, han puesto en riesgo a los habitantes costeros y los ecosistemas [Villatoro et al., 2014]. Para luchar contra este problema, se introduce una nueva forma de defensa costera, las mega-regeneraciones. Esta técnica de protección costera suave presenta cierta incertidumbre relativa a su durabilidad y evolución.

Por estos motivos el presente trabajo se centra en analizar la influencia que tiene el clima marítimo sobre la evolución espacial y temporal de las mega-regeneraciones. Tras un primer capítulo introductorio, el capítulo 2 se ha dedicado a explicar los conceptos básicos de las mega-regeneraciones y a analizar los antecedentes.

Para poder estudiar este fenómeno, se ha realizado un modelo numérico de una mega-regeneración sin localización definida, empleando el software Delft3D. Los detalles del modelo están descritos en el capítulo 3. Se estudiará la influencia que tienen diferentes escenarios climáticos en la evolución de la mega-regeneración. Los escenarios definidos difieren principalmente en los valores de carrera de marea y clima de las olas.

En total se han definido un conjunto de 36 escenarios, con objeto de identificar los cambios que en la línea de costa provocan las variaciones de: altura de ola, dirección del oleaje, período del oleaje y amplitud de marea. Estos resultados se analizan detenidamente en el capítulo 4.

Las conclusiones que podemos extraer de este estudio son muy variadas y se analizan en detalle en el capítulo 5 de este trabajo. Sin embargo, desde el punto de vista de qué combinaciones de clima marítimo conducen mayores anchos de playa seca, podemos concluir que para la batimetría analizada, los casos que presentan oleaje de largo período (12 s), mayor altura de ola (2 m) y grandes amplitudes de marea (2 m), son los que conducen a mayores anchos de playa seca.

Finalmente, en el capítulo 6 se proponen una serie de recomendaciones para optimizar las mega-regeneraciones y alargar su vida útil.

Abstract

Currently, almost half of the world's population lives in coastal areas. However, 70% of the world's beaches are suffering erosion. In addition, the continuous growth of population and industries that has taken place near the coast for decades, together with climate change and the consequent increase in sea level, have put coastal inhabitants and ecosystems at risk (Villatoro et al. al., 2014). To combat this problem, a new form of coastal defense, mega-nourishments, is introduced. This technique of soft coastal protection presents some uncertainty regarding its durability and evolution.

For these reasons, this report focuses on analyzing the influence of the wave climate on the spatial and temporal evolution of mega-nourishments. After a first introductory chapter, chapter 2 has been used to explain the basic concepts of mega-nourishments and an analysis of the antecedents.

To do this, a numerical model of a mega-nourishment without a defined location is performed, using the Delft3D software. The details of the model are explained in chapter 3. The influence that different climatic scenarios have on the evolution of mega-nourishments will be studied. The defined scenarios differ mainly in the values of tidal range and wave climate.

In total, a set of 36 scenarios has been defined in order to identify changes in the coastline caused by variations in wave height, wave direction, wave period and tidal range. These results are discussed in detail in chapter 4.

The conclusions that we can draw from this study are very varied and are analyzed in detail in chapter 5 of this report. However, from the point of view of which wave climate combinations lead to greater dry beach widths, we can conclude that cases with longer wave periods together with higher wave heights and tidal amplitudes lead to greater widths of dry beach.

Finally, in chapter 6, a series of recommendations are proposed to optimize mega-nourishments and lengthen their useful lifespan.

Índice Abreviado

<i>Resumen</i>	III
<i>Abstract</i>	V
<i>Índice Abreviado</i>	VII
1 Introducción	1
1.1 Motivación	1
1.2 Objetivos	2
2 Regeneración de playas	3
2.1 Definiciones previas	3
2.2 Un cambio de paradigma	4
2.3 Marco de referencia	4
2.4 Métodos constructivos	6
2.5 Modelo de una línea	11
2.6 Revisión bibliográfica	13
3 Metodología	15
3.1 Definición de escenarios: batimetría y combinaciones de clima	15
3.2 Modelo numérico de cálculo: Delft3D	18
3.3 Implementación del modelo numérico de cálculo	21
3.4 Análisis de sensibilidad del modelo	27
4 Resultados	33
4.1 Análisis 1 variable de entrada	35
4.2 Análisis multivariable	45
4.3 Clasificación de perfiles transversales	56
5 Conclusiones	63
6 Recomendaciones	65
<i>Índice de Figuras</i>	67
<i>Índice de Tablas</i>	69
<i>Bibliografía</i>	71

Índice

<i>Resumen</i>	III
<i>Abstract</i>	V
<i>Índice Abreviado</i>	VII
1 Introducción	1
1.1 Motivación	1
1.2 Objetivos	2
2 Regeneración de playas	3
2.1 Definiciones previas	3
2.2 Un cambio de paradigma	4
2.3 Marco de referencia	4
2.4 Métodos constructivos	6
2.4.1 Regeneración mediante dragas	7
2.4.1.1 Dragas de tuberías	7
2.4.1.2 Dragas de tolva	9
2.4.2 Regeneración mediante camiones	10
2.4.3 Regeneración mediante cintas transportadoras	10
2.5 Modelo de una línea	11
2.5.1 Aplicación práctica de la ecuación del modelo de una línea	12
2.6 Revisión bibliográfica	13
3 Metodología	15
3.1 Definición de escenarios: batimetría y combinaciones de clima	15
3.2 Modelo numérico de cálculo: Delft3D	18
3.2.1 Módulo Wave	19
3.2.2 Módulo Flow	19
3.2.2.1 Modelo hidrodinámico	20
3.2.2.2 Modelo morfodinámico	20
3.3 Implementación del modelo numérico de cálculo	21
3.3.1 Malla o grid	21
3.3.2 Implementación de los módulos Wave y Flow	22
3.3.3 Condiciones de contorno (oleaje)	23
3.3.4 Condiciones de contorno (hidrodinámicas)	24
3.3.5 Fricción	25
3.3.6 Definición del sedimento	25
3.3.7 Morfología	26
3.3.8 Tiempo de simulación	26
3.4 Análisis de sensibilidad del modelo	27
4 Resultados	33

4.1	Análisis 1 variable de entrada	35
4.1.1	Influencia de la carrera de marea.	35
4.1.2	Influencia de la dirección del oleaje.	37
4.1.3	Influencia del período pico.	42
4.1.4	Influencia de la altura de ola.	43
4.2	Análisis multivariable	45
4.2.1	Análisis 1	46
4.2.2	Análisis 2	47
4.2.3	Análisis 3	48
	4.2.3.1 Caso 12	50
	4.2.3.2 Caso 20	53
4.3	Clasificación de perfiles transversales	56
4.3.1	Análisis Avance/Retroceso	59
5	Conclusiones	63
6	Recomendaciones	65
	<i>Índice de Figuras</i>	67
	<i>Índice de Tablas</i>	69
	<i>Bibliografía</i>	71

1 Introducción

In nature there are neither rewards nor punishments; there are consequences - Robert Green Ingersoll -

1.1 Motivación

Proteger las costas de la erosión es un asunto importante en el contexto del cambio climático y la necesidad creciente de un desarrollo sostenible. Para afrontar el continuo crecimiento de la población y la industria en las zonas costeras que ha tenido lugar durante años junto con el cambio climático y el consecuente ascenso del nivel del mar, los ingenieros de costa han ideado diferentes métodos de defensa. El reto es mantener estable la línea de costa. Se distingue entre:

- **Método de defensa duros:** incluyen diques, rompeolas, revestimientos y otras estructuras. Estos sistemas suelen ser muy costosos, generando un impacto permanente en el entorno natural. Sin embargo, en ciertos casos son la única solución posible a corto plazo para proteger a los habitantes y las estructuras.
- **Métodos de defensa suaves:** son las regeneraciones. Consisten fundamentalmente en la alimentación periódica de la playa con grandes volúmenes de sedimentos. Son más respetuosas con el medio ambiente y la vida marina.

Este trabajo se centra en el estudio de la evolución que sufren las regeneraciones, con el objetivo de analizar la influencia que tienen clima marítimo y la carrera de marea en su vida útil. La regeneración de costas ha sido muy usada para la protección costera por investigadores e ingenieros de todo el mundo debido a que tiene grandes ventajas: protege a las costas frente a la erosión, restaura los hábitats de las diferentes especies marinas y aves y proporciona unos lugares propicios para la reproducción animal.

Un proyecto de regeneración consiste en agregar grandes volúmenes de arena a la playa, empleando un sedimento que puede proceder de diferentes fuentes como son: fondos marinos, zonas desérticas o zonas próximas, con el objetivo de restaurar la playa que ha sido erosionada y establecer un nivel de protección adecuado. En general estos proyectos se diseñan y construyen con el objetivo de aprovechar las fuerzas naturales como son el oleaje y las corrientes para que distribuyan adecuadamente el sedimento. Este proceso, que suele denominarse ajuste del perfil de equilibrio, da como resultado un perfil natural en la playa que suele acarrear en general una disminución del ancho de playa seca y grandes pérdidas de volumen de sedimento. Esto provoca que la periodicidad con la que hay que hacer la regeneración genere grandes costes e impactos negativos sobre los ecosistemas marinos.

Para solventar este problema se han ideado soluciones innovadoras a gran escala como son las mega-regeneraciones. A lo largo del tiempo, los volúmenes de regeneración de playas se han incrementado desde los $100 \text{ m}^3/\text{m}$ de material sedimentario distribuido en dirección transversal a la costa hasta los $600 \text{ m}^3/\text{m}$. Este trabajo se centra exclusivamente en el análisis de las mega-regeneraciones, no considerando procesos asociados a pequeñas regeneraciones. La idea principal de esta técnica es aplicar una cantidad masiva de

sedimento marino a un tramo de playa y esperar a que las fuerzas hidrodinámicas hagan el resto de la tarea. Uno de los aspectos negativos de las mega-regeneraciones que aún no han sido analizados detenidamente es el bloqueo de transporte de sedimentos que temporalmente podrían producir.

Hasta la actualidad se han llevado a cabo varios proyectos de mega-regeneraciones en diferentes localizaciones. Debido a que ha sido objeto de numerosos artículos, hay que destacar la mega-regeneración que tuvo lugar cerca de Ter Heijde, en los Países Bajos en 2011. Se emplearon unos 20 millones de m³ de arena. Es conocido como Sand Engine y se construyó con forma de gancho de unos 2,5 km de longitud y 1 km de ancho en dirección transversal a la costa. Se estimó que dicha regeneración proporcionaría protección durante unos 20 años, preservaría la ecología local y reduciría costes a largo plazo.

A modo de resumen es importante aclarar que las mega regeneraciones requieren de estudios morfológicos detallados para conocer su evolución y vida útil. Así como para minimizar las consecuencias negativas de las mismas. Se plantea como una herramienta necesaria el monitoreo continuo y preciso de las mega-regeneraciones, de modo que los datos extraídos sirvan para la toma de decisiones de futuros proyectos.

En la actualidad el trabajo se enfoca en investigar a fondo el fenómeno de las mega-regeneraciones mediante modelos numéricos y analíticos. Este trabajo se va a centrar en el diseño y análisis, mediante un modelo numérico, de una mega-regeneración sometida a diferentes escenarios climáticos.

1.2 Objetivos

El objetivo principal de este Trabajo de Fin de Máster es analizar la influencia que tienen el clima marítimo y la carrera de marea sobre la vida útil y evolución de una mega-regeneración (en adelante regeneración). Para ello se va a realizar un modelo numérico de una regeneración típica que se emplazará en una ubicación ficticia. El objetivo no es analizar qué ocurre en una ubicación concreta y real, sino estimar qué variables del clima marítimo son más influyentes en la evolución de las regeneraciones. Se va a realizar una comparativa entre 36 escenarios. En dichos escenarios la batimetría de la zona y la geometría de la regeneración de partida serán las mismas. Únicamente variará el clima marítimo, concretamente:

- Direccionalidad del oleaje.
- Altura de ola.
- Período del oleaje.
- Amplitud de la marea.

Para ellos se va a usar el software Delft3D, que está enfocado a trabajos computacionales 3D en costas, ríos y estuarios. Permite realizar simulaciones de corrientes, mareas, oleaje, transporte de sedimentos, calidad del agua y ecología. Está compuesto por diversos módulos unificados bajo una misma interfaz de usuario que son capaces de interactuar entre sí. En este trabajo se van a usar los módulos Wave y Flow. El módulo Wave simula la propagación de oleaje desde aguas profundas hacia la costa considerando las condiciones de contorno indicadas por el usuario. El módulo Flow permite analizar las condiciones hidrodinámicas (velocidades, elevación del nivel del mar, densidad, salinidad, etc...) así como el transporte de sedimentos (longitudinal y transversal) y por tanto los cambios morfológicos en la franja litoral.

Considerando lo que pretendemos conseguir y las herramientas de las que disponemos, podríamos resumir los objetivos principales de este trabajo en los siguientes:

- Identificar cuáles son las geometrías iniciales más habituales en las regeneraciones.
- Generar una batimetría sobre la que emplazar la regeneración, que pueda ser representativa de un porcentaje alto de las costas del mundo.
- Implementar un modelo numérico que permita resolver los procesos hidro-morfodinámicos que actuarán.
- Analizar y evaluar el efecto que la dinámica litoral tiene sobre la regeneración, comparando las soluciones obtenidas en los diferentes escenarios.
- Alcanzar conclusiones y proponer recomendaciones.

2 Regeneración de playas

2.1 Definiciones previas

La **regeneración** es el proceso artificial mediante el cual se aporta sedimento a una playa para incrementar su valor recreativo y proteger la costa frente a la erosión. Dicho sedimento puede ser dragado de zonas cercanas y bombeado hacia la playa o transportado desde fuentes externas. Se considera un método suave de estabilización de costas. La colocación de material sedimentario en un montículo cercano a la costa se realiza con la expectativa de que la arena se moverá por la acción de las olas, para así crear un perfil estable y promover la disipación de la energía de las olas antes de llegar a la playa seca.

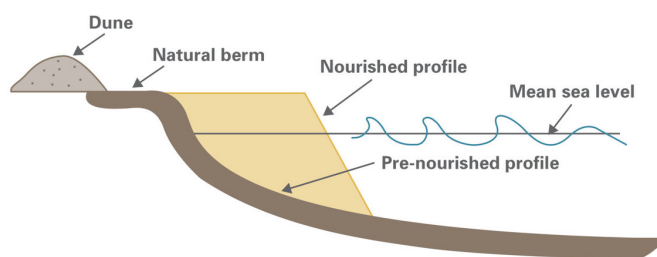


Figura 2.1 Esquema de una regeneración. Fuente: [Waters, 2018].

El **área de préstamo**, de acuerdo con [Dean, 2003], es el área de la que se extraen los sedimentos que se emplearán en la regeneración. Puede estar ubicada en la costa o en el interior (canteras, dunas, etc ...). Habitualmente se realiza una búsqueda previa, para determinar una o más áreas de préstamo que dispongan de la cantidad y calidad de sedimento requerido.

La **línea de costa** se define como el contorno que se genera en la intersección entre la playa seca y el nivel medio del mar.

Es fundamental analizar la **compatibilidad** entre el sedimento que se va a emplear en la regeneración y el sedimento nativo. En un sentido amplio, nos referimos a dos aspectos fundamentales: la compatibilidad biológica y la compatibilidad granulométrica. La compatibilidad biológica se refiere a la idoneidad biológica del sedimento empleado. Debe evitarse la introducción de especies invasoras así como el empleo de materiales contaminantes. La compatibilidad granulométrica se refiere a las diferencias de tamaño entre la arena presente en el perfil de playa original y la arena que se considere para la regeneración. Esto puede analizarse mediante la comparación de sus curvas granulométricas. Algunos métodos, descritos detalladamente en [Dean, 2003], están disponibles para cuantificar la compatibilidad granulométrica, algunos de los cuales consideran sólo los diámetros medios, mientras que otros emplean parámetros que definen las distribuciones de tamaño de grano. De manera general se busca que el tamaño del sedimento de aportación sea similar o mayor que el nativo.

Por otro lado, la **profundidad de cierre** (h_*) es la profundidad a la que deja de moverse el sedimento. Es un concepto de ingeniería marítima muy importante para el diseño de regeneraciones. Por definición, al relacionarse h_* con la altura de ola significativa que es superada 12 horas al año, es un parámetro que puede

variar anualmente. Matemáticamente puede escribirse como:

$$h_* = 1,57H_{s,12} \quad (2.1)$$

A partir de la profundidad de cierre, el oleaje no tiene influencia en la forma del perfil de playa. La zona de perfil que va desde la línea de costa hasta esa profundidad se llama **zona de perfil activo** [Ruiz, 2018].

2.2 Un cambio de paradigma

La regeneración de playas se ha utilizado con mucha frecuencia en las últimas décadas en todo el mundo, en detrimento de las técnicas de protección duras (p.ej. espigones, rompeolas, muros de defensa). Por ejemplo, en los Estados Unidos de América, según [Aleixo Pinto et al., 2018], el número de regeneraciones realizadas por el US Army Corps of Engineers (USACE), aumentó notablemente desde finales de los años sesenta y principios de los setenta. La figura siguiente muestra cómo la mayor parte del gasto se destinaba a medidas duras hasta la década de 1970, momento a partir del cual las regeneraciones asumieron todo el protagonismo:

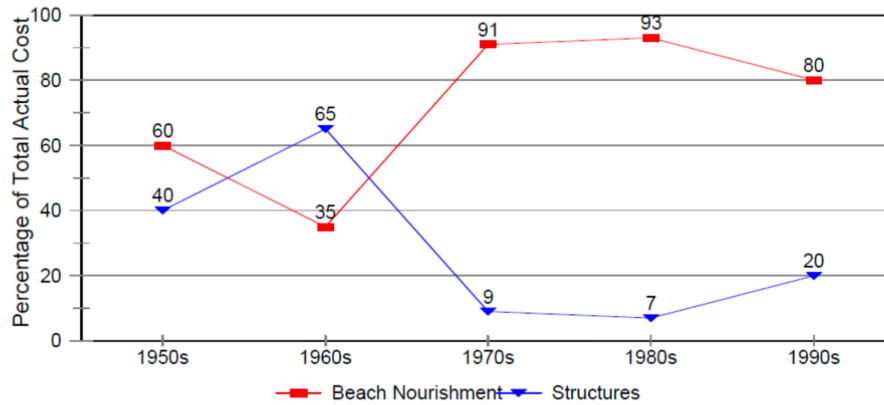


Figura 2.2 Evolución del gasto en defensa costera en los EE.UU, dependiendo del tipo de intervención - regeneración de playa (líneas y marcas rojas) y estructuras costeras (líneas y marcas azules). Fuente: Hillyer(1996).

2.3 Marco de referencia

La regeneración es una práctica que consiste en añadir grandes cantidades de sedimento a las playas para incrementar el ancho seco y combatir la erosión. Una playa más amplia puede reducir los daños que ocasionan las tormentas, al disipar la energía en la zona de surf.

Con el aumento del nivel del mar y las tormentas cada vez más violentas y frecuentes, es probable que la regeneración continúe siendo la técnica más ampliamente utilizada por las administraciones para proteger las valiosas propiedades costeras.

De hecho, la European Environment Agency señala que el nivel medio del mar en 2016 a escala mundial registró su valor más alto desde que comenzaron las mediciones a finales del siglo XIX. Se encontraba 20 cm más alto que a comienzos del siglo XX.

El quinto informe de evaluación (AR5) del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) indica que la tasa media de aumento del nivel del mar en el siglo XX osciló entre los 1,2 y 1,7 mm/año. Esto aumentó desde 1993 hasta los 3 mm/año. Asimismo, señala que el aumento medio mundial del nivel del mar durante el siglo XXI probablemente ocurrirá a un ritmo mayor que durante el período 1971-2010. Estima que es probable (66% probabilidad) un aumento del nivel medio del mar en un rango de 0.28-0.61 m, para un escenario de bajas emisiones (RCP2.6), y de 0.52-0.98 m para un escenario de altas emisiones (RCP8.5).

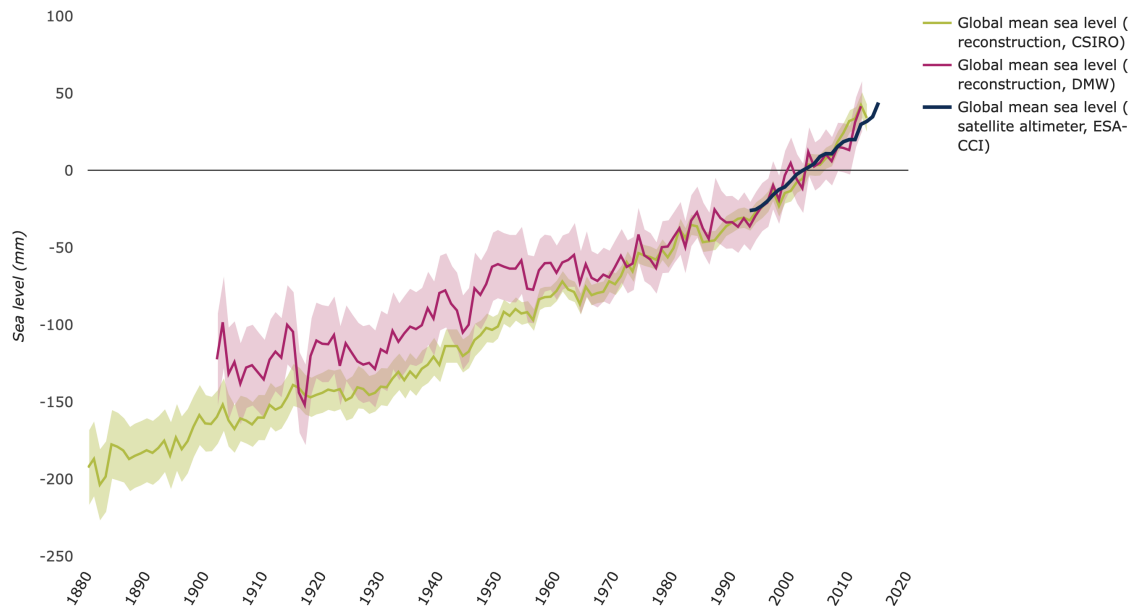


Figura 2.3 cambios observados nivel medio del mar mundial. Fuente: European Enviroment Agency.

Estas estimaciones nos hacen prever que será cada vez más necesario el desarrollo de técnicas que permitan proteger las costas frente al avance del nivel del mar en puntos de especial interés. Sin olvidar la necesidad de una elaborar unas políticas de ordenación del territorio que alejen las nuevas infraestructuras de las zonas que posiblemente estén inundadas en un futuro y asimismo permitan ir reubicando progresivamente las existentes en zonas más hacia el interior. Para resolver esta problemática, se ha impuesto en las últimas décadas el empleo de regeneraciones de playa; una solución rápida y de menor impacto ambiental, aunque temporal.

Material de aportación

La selección del material idóneo para un proyecto de regeneración depende de las necesidades de diseño, los factores medioambientales y el coste del transporte, considerando las implicaciones tanto a corto como a largo plazo. La característica de más relevancia es el tamaño medio del sedimento (D_{50}). Asimismo, un exceso de limos y arcillas puede generar turbidez en las aguas, lo cual hace que algunas zonas de préstamo no sean aptas.

El Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX) indica, que no son adecuados para su uso en playas, sin hacer estudios complementarios, los materiales que cuya concentración media supere para alguno de los parámetros en más de un 20% los límites de los valores que se incluyen en la Tabla 2.1:

Tabla 2.1 Concentración límite en las arenas a aportar a playas. Fuente CEDEX.

Metal	Concentración mg/kg (sms)
Hg	0.1
Cd	0.4
Pb	45
Cu	35
Zn	150
As	30
Ni	45
Cr	100

Consecuencias de una regeneración

Consideremos algunos de los efectos, tanto positivos como negativos, que pueden producir la ejecución de una regeneración:

- Aumenta del ancho de playa seca.
- Se consigue proteger las infraestructuras situadas detrás de la playa.
- La entrada repentina de grandes cantidades de arena puede matar a los animales que viven en la playa.
- Durante la regeneración, la playa se convierte en una importante zona de construcción. La maquinaria pesada empleada para transportar y distribuir el sedimento también altera los ecosistemas y la vida silvestre.
- Acceso restringido durante la regeneración.
- La arena puede no ser del mismo tamaño de grano o composición química que el material nativo, modificando el hábitat del que dependen los seres vivos.
- La reducción de animales en el mar hace que las aves costeras tengan que viajar a otras playas para encontrar comida.
- No se conoce el tiempo necesario para que un ecosistema de playa se recupere tras un episodio de regeneración, incluso cuando el tamaño y composición del material de aportación es igual al nativo. Los episodios de regeneraciones sucesivas pueden impedir la recuperación de la comunidad de la playa y el ecosistema.
- Las especies longevas que no se reproducen a menudo, como las almejas Pismo, pueden tardar décadas en recuperarse.
- A medida que el océano comienza a erosionar la arena introducida, el agua de la costa puede volverse fangosa, lo que podría asfixiar la vida marina, impedir la correcta penetración de la luz solar y cambiar la calidad del agua costera. Las criaturas que dependen del agua limpia y clara (organismos fotosintéticos como corales y tridacnas) pueden morir masivamente.
- La arena erosionada puede cubrir bosques de alga y arrecifes, destruyéndolos.

Como ya se mencionó anteriormente, las mega-regeneraciones permiten reducir drásticamente la frecuencia con la que es necesario aportar nuevo material y permiten que sean las fuerzas oceánicas las que redistribuyan el sedimento de manera progresiva y natural. Por tanto, se prevé que las mega regeneraciones eliminen muchos de las consecuencias negativas que tradicionalmente han ocasionado las aportaciones de pequeños volúmenes de sedimento.

Efectividad de las regeneraciones

La regeneración no es una solución definitiva a largo plazo frente a la erosión de las playas. Las fuerzas erosivas de las olas, las tormentas y el aumento del nivel medio del mar no desaparecen después de que se produce la regeneración. Las olas continúan embistiendo la arena y finalmente erosionándola y arrastrando el sedimento hacia otras zonas. Por tanto, la regeneración puede proteger las estructuras costeras mientras dure la arena, pero tras un período de tiempo, la playa tendrá que ser renovada. El motivo es que no se eliminan las causas que generan la erosión, puesto que es imposible. En este TFM se evalúa la afección que tienen los agentes externos mencionados en la durabilidad de la obra.

Coste de una regeneración

En muchas zonas costeras, el impacto económico de una playa puede ser sustancial. El litoral de 16 km que bordea Miami Beach se regeneró durante el período 1976-1981. El coste fue de aproximadamente 64 millones de dólares y consiguió revitalizar la economía de la zona.

2.4 Métodos constructivos

El material que se emplea en los proyectos de regeneración de costas puede ser de procedencia terrestre o marítima. En el primer caso los sedimentos son obtenidos de yacimientos o canteras. En el segundo caso, el material suele proceder del dragado de fondos marinos, ríos, lagos o embalses que fueron colmatados. En

cualquiera de los casos, resulta fundamental que la fuente de suministro se encuentre en una localización próxima a la regeneración, debido a los grandes volúmenes de sedimento que se manejan, el transporte a larga distancia haría el proyecto económicamente inviable.

Debido a que los sedimentos marinos suelen contener pocos finos y, en general, una granulometría apropiada, suelen ser una de las primeras opciones a considerar. Por tanto, en este trabajo vamos a centrarnos en los procesos constructivos más habituales para la obtención de sedimentos marinos.

Algunos de los métodos que pueden emplearse en los proyectos de regeneración para la colocación del sedimento son: el dragado con impulsión directa, el transporte con camiones y el uso de cintas transportadoras.

2.4.1 Regeneración mediante dragas

La regeneración de playas se puede conseguir a través de técnicas de dragado. En zonas de altar mar (o cerca de la costa) una draga puede extraer material sedimentario (habitualmente arena) y conducirlo hacia una zona de descarga en las proximidades de la playa. El paso final es extender el sedimento.

Se estima que más del 95% del volumen total de sedimento vertido en proyectos de regeneración procede de dragados offshore. Las ventajas son claras: por un lado, se dispone de cantidades grandes de sedimento adecuado a distancias comprendidas entre 1 y 20 km aproximadamente del lugar de regeneración. Por otro lado, podemos decir que estos métodos son relativamente poco perjudiciales para el medio ambiente. Asimismo, el coste por unidad de metro cúbico vertido es generalmente menor que en otras técnicas.

Existen muchos factores que condicionan el proceso de dragado, algunos de ellos son:

- Aumenta del ancho de playa seca.
- La profundidad de extracción.
- El clima marítimo: oleaje, viento, mareas, corrientes, etc...
- Volumen total que extraer.
- Tráfico marítimo.
- Zonas de especial valor ecológico.
- Granulometría del material.

Asimismo, existen otros factores asociados a las características de la zona de vertido, como pueden ser:

- La extensión de la zona a regenerar.
- La geometría de la zona a regenerar (trazado en planta y perfil).
- Profundidades de trabajo.
- Naturaleza del fondo.
- El estado del mar.

Teniendo en cuenta estos factores, así como otros condicionantes de tipo ambientales, técnicos y socioeconómicos, los métodos de ejecución más ampliamente usados van a ser descritos en este capítulo.

2.4.1.1 Dragas de tuberías

Dentro de los métodos de dragado, podemos distinguir dos técnicas principales. La primera es el dragado mediante tuberías. Consiste en el uso de una draga que se desplaza sobre la zona de préstamo y excava un banco de sedimento, el cuál es correctamente aprovechado si su altura es de al menos 1,5 metros. Un esquema de su funcionamiento puede apreciarse en la Figura 2.5:

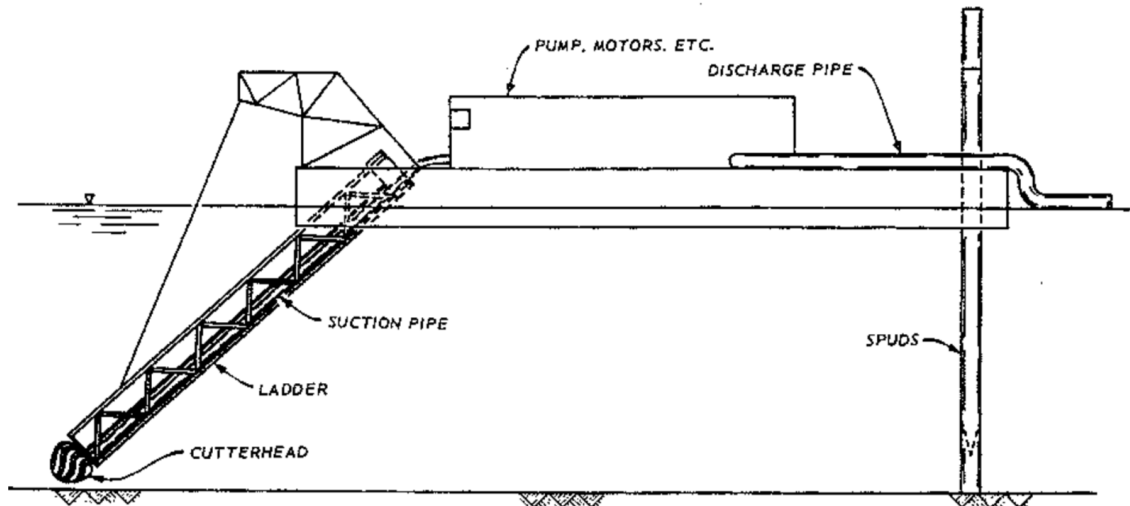


Figura 2.4 Esquema de una draga con cabeza de corte. Fuente: [Dean, 2003].

La draga consiste en una barca flotante y una estructura que se coloca en la proa de la barcaza. Dicha estructura aloja la tubería de entrada de sedimento y está articulada para que pueda moverse verticalmente y así acceder con facilidad al banco de sedimento. Cerca del extremo de la estructura articulada se emplaza una bomba cuya función es absorber la mezcla agua-sedimento, que es conducida hasta la barcaza donde una bomba principal de mayor potencia genera la suficiente presión como para lanzar esa mezcla de agua-sedimento hasta una distancia considerable a través de unas tuberías sumergidas o flotantes que culminan en la zona de la regeneración. Si la distancia de bombeo es demasiado elevada, las pérdidas de carga en el tubo de dragado también lo serán. Esto hace que las velocidades de circulación sean muy reducidas y por tanto se produzcan depósitos en el tubo, dificultando la salida del material sedimentario. En este caso sería necesaria la presencia de una o varias bombas de reimpulsión para impulsar el material a mayores distancias de una forma eficiente.



Figura 2.5 Imagen bombas de reimpulsión. Fuente: <http://shop.dredgecentral.com/product/booster-dredge-pump-assembly-20x18/>.

De manera general, la draga trabajará en una posición fija hasta que se determine que la proporción de arena que se está bombeando está por debajo de un valor concreto. Es justo en este momento cuando la tubería de succión debe desplazarse.

Las dragas de tuberías se pueden clasificar en dos grupos:

- **De succión:** básicamente consisten en un tubo abierto que permite la entrada de sedimento. Suelen instalarse unos chorros que agiten el sedimento y faciliten la entrada en el conducto. Son las más adecuadas cuando el sedimento es de pequeño diámetro.
- **Con cabeza de corte:** disponen de un dispositivo de corte en las proximidades del tubo de entrada de sedimento. Unos dientes o palas de acero se emplean como elemento auxiliar para movilizar el sedimento.

La sección de la tubería de la draga es función de la longitud a la que hay que bombear el sedimento. Habitualmente varía entre 6 y 36 pulgadas. Si la draga es pequeña, se puede desmontar con facilidad y transportar hacia otras áreas. De forma general, mientras más grande es la draga, menor es el coste por unidad de volumen de material dragado y mayor es la eficiencia hidráulica. Las pérdidas de carga hidráulicas son inversamente proporcionales al diámetro de las conducciones y directamente proporcionales al cuadrado de la velocidad del lodo (sedimento-agua) transportado. A continuación, se presentan en la Tabla 2.2 los valores aproximados del volumen total descargado por una draga en función del tamaño de la conducción de descarga:

Tabla 2.2 Valores aproximados de la capacidad de bombeo en función del tamaño del tubo de descarga. Fuente: [Dean, 2003].

Diámetro tubo de descarga (pulgadas)	Volumen de dragado aproximado m^3/dia
12	4000
18	9000
24	15000
30	23000
36	34000

La conducción de descarga suele tener un tramo flotante que permite a la draga moverse con libertad en las proximidades de la zona de préstamo, seguida de un tramo sumergido que se extiende hacia la playa.

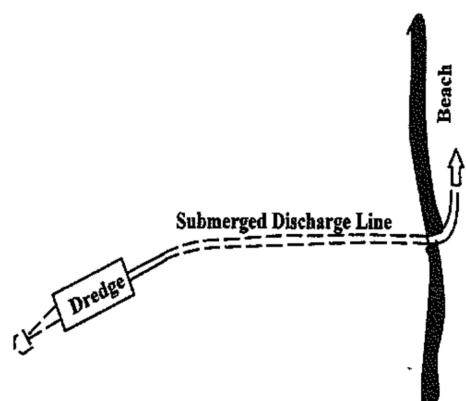


Figura 2.6 Tramos flotante y emergido de la conducción de descarga. Fuente: [Dean, 2003].

El hecho de que la mayor parte de la tubería esté sumergida es para protegerla de la acción del oleaje. Una tubería flotante está mucho más expuesta que una sumergida que descansa en el fondo. Si la acción del oleaje es demasiado violenta y obliga a paralizar las tareas temporalmente, el tramo sumergido se mantiene a flote y se deja en su lugar mientras la draga busca refugio.

Estos equipos consisten básicamente en una bomba, tubería y una barcaza rectangular, por lo que no resultan muy adecuadas para navegar.

2.4.1.2 Dragas de tolva

La segunda técnica de dragado consiste en el uso de una draga de tolva. Básicamente es un barco equipado con bombas de dragado y unos brazos que se extienden desde los lados del barco hacia el fondo marino, con

la capacidad de eliminar material del fondo y bombear la mezcla de sedimento-agua hacia el casco de la nave. Esta operación tiene lugar con el barco en movimiento a una velocidad de 2-3 nudos.

Una vez descargado el material en el casco, la arena se queda en el fondo de la nave (debido a su mayor densidad) y el agua desborda hacia fuera de la draga a medida que se va añadiendo más material. Una vez que el casco de la nave se llena con arena hasta su máxima capacidad, el barco se desplaza hacia la zona de la regeneración, donde abre las puertas de la tolva y deja caer el sedimento hacia el fondo.

Otro sistema para trasladar el sedimento desde la barcaza hasta la zona de regeneración es mediante el “método del arcoíris”. Consiste en lanzar mediante un chorro la mezcla de sedimento-agua a través de un conducto situado en la proa. El inconveniente es que para que el barco pueda acercarse a costa, las condiciones de oleaje deben ser muy suaves.



Figura 2.7 Lanzamiento de un chorro de mezcla sedimento-agua. Fuente: <https://www.fm-middleeast.com/>.

2.4.2 Regeneración mediante camiones

Como ya se mencionó con anterioridad, la mayoría de las regeneraciones se realizan mediante el dragado del fondo marino. Solo un pequeño número de regeneraciones son realizadas mediante el transporte en camiones de sedimentos procedentes de zonas terrestre. El motivo fundamental es que los volúmenes manejados son demasiado elevados. Sólo cuando el sitio de préstamo se encuentra muy cerca y los volúmenes totales son pequeños podrías considerar este sistema. Dado que este trabajo se centra en las grandes regeneraciones (mega-regeneraciones), no se va a tratar este método con más profundidad.

2.4.3 Regeneración mediante cintas transportadoras

Las cintas transportadoras ya se emplean en otros ámbitos marítimos para el transporte de material seco granular, como pueden ser la descarga de carbón desde los buques. Aunque no son muy habituales, es una realidad que las cintas transportadoras se han empleado en algunos procesos de regeneración. Ejemplo de ello es la regeneración de Redington Beach (California).

El proceso constructivo consiste inicialmente en dragar la arena a una cierta distancia del lugar donde se va a ejecutar la regeneración. Posteriormente se acerca la barcaza cargada de arena hacia el lugar a regenerar y se amarra. Sobre un extremo de la barcaza se apoya una cinta transportadora sobre la que una cuchara bivalva presente en la barcaza, vierte la arena poco a poco. Esa arena es transportada hacia tierra por la cinta y cae sobre unos camiones que se encargan de distribuir la arena en la playa convenientemente.

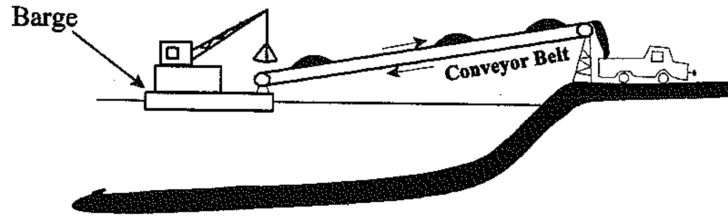


Figura 2.8 Representación esquemática de una regeneración empleando cintas transportadoras. Fuente: [Dean, 2003].

2.5 Modelo de una línea

El modelo de una línea es un modelo de evolución morfológica que permite analizar la evolución temporal de la forma en planta de la línea de costa dadas una condiciones de oleaje. En este modelo se adoptan hipótesis que simplifican mucho el problema. Las ecuaciones básicas que se obtienen son válidas para tramos con pequeñas curvaturas y cambios suaves de la LC y su escala temporal de aplicación es de corto y medio plazo (máximo 25 años). El modelo de una línea proporciona una solución analítica a problemas sencillos que podemos comparar con las soluciones numéricas.

Hipótesis iniciales:

- El transporte de sedimentos responsable de la evolución de la costa es fundamentalmente longitudinal (se desprecia la influencia del transversal)
- La playa ha alcanzado y mantiene el perfil de equilibrio ($h(y) = y^{2/3}$)
- El perfil se mueve solidariamente con la LC sin deformarse, por lo que la evolución de la costa puede estudiarse analizando la evolución de una sola línea batimétrica (por su importancia se escoge $z = 0$)

Para obtener las ecuaciones del modelo, realizamos un balance de masa en la rebanada:

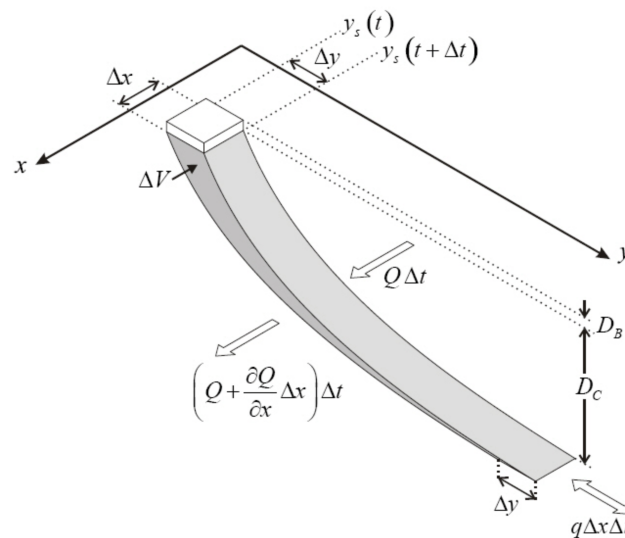


Figura 2.9 Balance de masas en una rebanada. Fuente: [Ruiz, 2018].

$$\left(Q + \frac{\partial Q}{\partial x} \Delta x\right) \Delta t + D_c \Delta x \Delta y = Q \Delta t \quad (2.2)$$

Operando:

$$\frac{\partial y}{\partial t} = -\frac{1}{D_c} \frac{\partial Q}{\partial x} \quad (2.3)$$

Si consideramos las siguientes hipótesis adicionales:

- Los cambios en la LC son suaves, por lo que $\frac{\partial y}{\partial x}$ es pequeño y $\left(\frac{\partial y}{\partial x}\right)^2 \ll 1$

$$\sin \beta \simeq \frac{\partial y}{\partial x} \quad \cos \beta \simeq 1$$

- Las variaciones longitudinales de α_b son despreciables, por lo que $\alpha_b \neq \alpha_b(x)$

$$\frac{\partial Q}{\partial x} = -GD_c \frac{\partial^2 y}{\partial x^2}$$

La ecuación del modelo de una línea queda:

$$\frac{\partial y}{\partial t} = -G \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \quad (2.4)$$

La Ecuación 2.4 junto con las condiciones de contorno e inicial adecuadas definen completamente el problema.

2.5.1 Aplicación práctica de la ecuación del modelo de una línea

La Ecuación 2.4 puede emplearse para conocer la evolución de una regeneración artificial de forma rectangular realizada sobre una playa infinitamente larga. En la Figura 2.10 se muestra en color rojo la posición inicial de la regeneración y en azul la evolución que sufre de acuerdo a la ecuación del modelo de una línea. Esta solución analítica se comparará con los resultados numéricos en el capítulo de resultados.

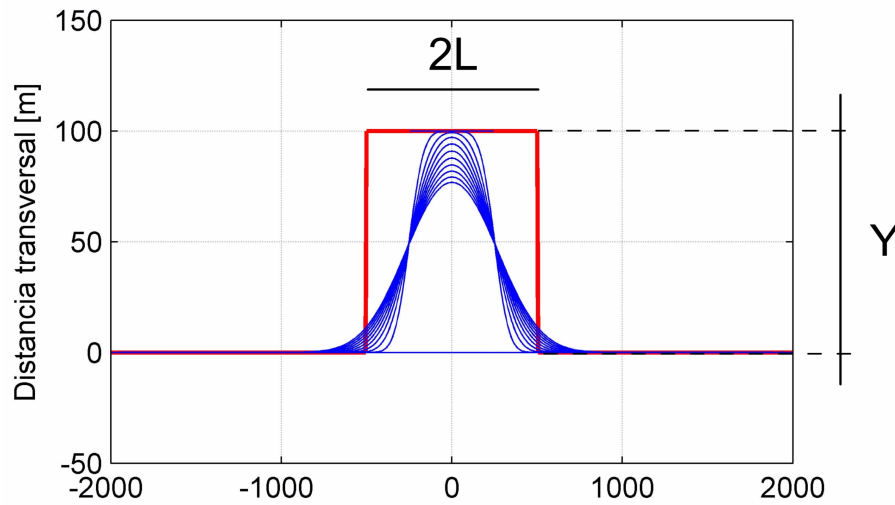


Figura 2.10 Evolución de una regeneración artificial de forma rectangular sobre una playa infinitamente larga, para un oleaje incidente de 180° (normal a la línea de costa). Fuente: [Ruiz, 2018].

Solución

$$y(x,t) = \frac{Y}{2} \left[\operatorname{Erf} \left[\frac{L}{4\sqrt{Gt}} \left(\frac{2x}{L} + 1 \right) \right] - \operatorname{Erf} \left[\frac{L}{4\sqrt{Gt}} \left(\frac{2x}{L} - 1 \right) \right] \right] \quad (2.5)$$

Siendo:

$$\operatorname{Erf}(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z \exp(-u^2) du \quad y(0,t) = Y \operatorname{Erf} \left(\frac{L}{4\sqrt{Gt}} \right)$$

2.6 Revisión bibliográfica

La regeneración de playas ha sido ampliamente usada por ingenieros e investigadores de todo el mundo para proteger las costas de la creciente erosión que sufren, proporcionar sitios recreativos o restaurar hábitats naturales [Valsamidis et al., 2017]. Algunos investigadores han analizado la influencia de las olas de elevado ángulo de incidencia en las formas que se crean en la línea de costa [Ashton and Murray, 2006]. También se han estudiado los impactos negativos en el ecosistema del sitio regenerado [Peterson and Bishop, 2006] y realizado numerosos modelos analíticos y numéricos para tratar de predecir la evolución de la línea de costa y la efectividad de la regeneración.

No obstante el concepto de mega-regeneración es relativamente nuevo. El primer trabajo de una mega-regeneración ocurrió en la costa occidental de los Países Bajos en el año 2011, entre las ciudades de Rotterdam y La Haya, y cerca de la cuenca del Mar del Norte [de Schipper et al., 2014]. En esta área, se transportaron 21,5 millones de metros cúbicos de sedimentos marinos y se depositaron para la formación de una península artificial que se extiende 3 km a lo largo de la playa y 1 km de distancia máxima en dirección mar adentro [Valsamidis et al., 2017]. Este proyecto se denominó Sand Engine. Los primeros años posteriores a la construcción de "Sand Engine" se han caracterizado por su impacto beneficioso en las playas cercanas.

Sin embargo, desde que se llevara a cabo la primera mega-regeneración, no se ha localizado ningún estudio ni investigación que analice de una manera exhaustiva la influencia que las variables: altura de ola, período del oleaje, dirección del oleaje y amplitud de marea ejercen actuando conjuntamente sobre la evolución de la línea de costa. Este trabajo de fin de máster pretende dar respuesta a esta cuestión y se realiza con el objetivo de que pueda servir como base para la planificación de futuros proyectos de mega-regeneraciones, permitiendo reducir costes y mejorar su eficiencia.

3 Metodología

En este apartado se va a realizar una explicación detallada de la metodología que se ha usado en este trabajo de fin de máster para alcanzar el objetivo final, que tal y como se mencionó con anterioridad es analizar la influencia que tiene el clima marítimo en la evolución y durabilidad de una regeneración de playa con sedimento de aportación.

Para ello se van a definir 36 escenarios, en los que se combinarán diferentes valores de las variables: amplitud de marea, direccionalidad del oleaje, período del oleaje y altura de ola. Las simulaciones se van a llevar a cabo sobre una misma zona costera. Para ello se modelará una batimetría ficticia que se empleará en todas las simulaciones, con el objetivo de que la forma de la costa no sea una variable adicional, lo cual extendería considerablemente la obtención de conclusiones.

Todos los escenarios van a simularse, como ya se mencionó anteriormente, mediante el software de cálculo DELFT 3D, que permite realizar simulaciones de corrientes, mareas, oleaje, transporte de sedimentos, calidad del agua y ecología. Está compuesto por diversos módulos unificados bajo una misma interfaz de usuario que son capaces de interactuar entre sí. En este trabajo se van a usar los módulos Wave y Flow. El módulo Wave simula la propagación de oleaje desde aguas profundas hacia la costa considerando las condiciones de contorno indicadas por el usuario. El módulo Flow permite analizar las condiciones hidrodinámicas (velocidades, elevación del nivel del mar, densidad, salinidad, etc...) así como el transporte de sedimentos (longitudinal y transversal) y por tanto los cambios morfológicos en la franja litoral.

A continuación, se van a describir el escenario de estudio y las combinaciones de clima marítimo simuladas. Posteriormente se describirá el modelo numérico y su implementación.

3.1 Definición de escenarios: batimetría y combinaciones de clima

Para generar la batimetría se ha empleado el software Matlab. Se ha considerado un dominio de estudio de 70 km de longitud y 15 km de ancho en dirección perpendicular a la línea de costa original como se puede observar en la Figura 3.2. La playa emergida inicial presenta una anchura total de 1 km con la siguiente geometría: un tramo inicial de cota constante e igual a 6 m, posteriormente esa cota se va reduciendo progresivamente con una pendiente del 1 %, hasta llegar a los 0 m. Respecto a la parte sumergida, se ha considerado un perfil Dean del tipo $h(x) = Ax^{2/3}$, donde h es la profundidad de agua (m) a la distancia x (m) de la línea de costa y A es 0.1, el valor recomendado para una arena de 200 μm [Dean, 1991] como se puede observar en la Figura 3.3

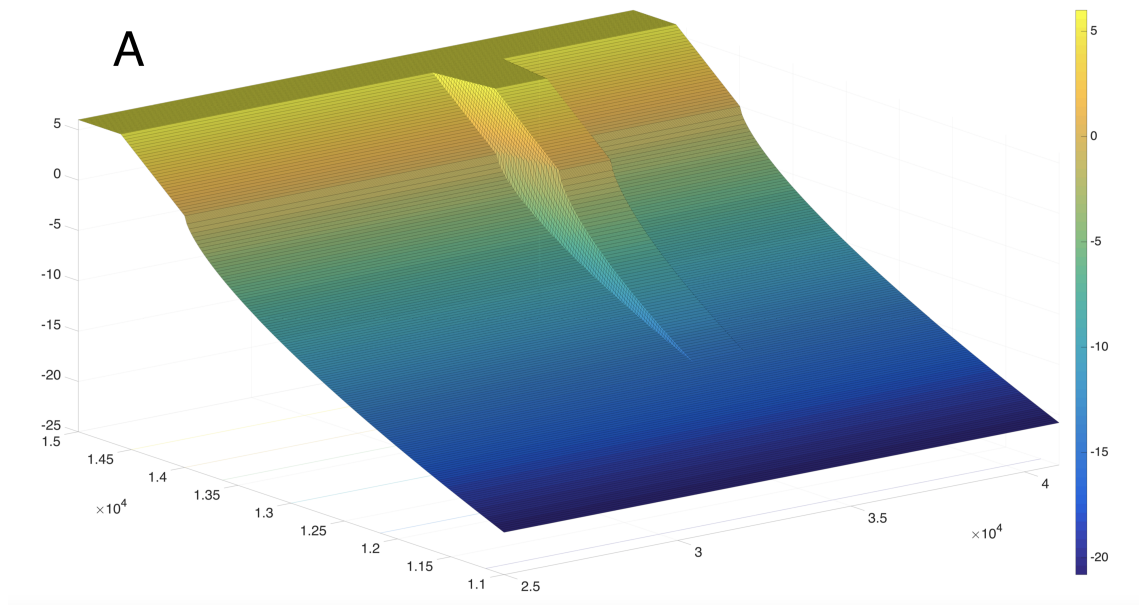


Figura 3.1 Representación 3D de la batimetría generada con Matlab.

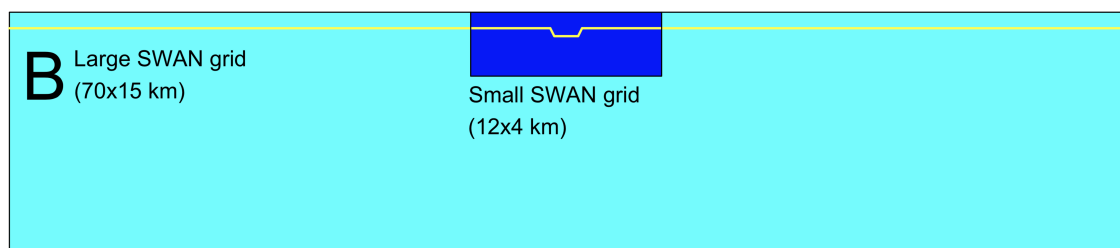


Figura 3.2 Dimensiones de las mallas empleadas en el modelo numérico.

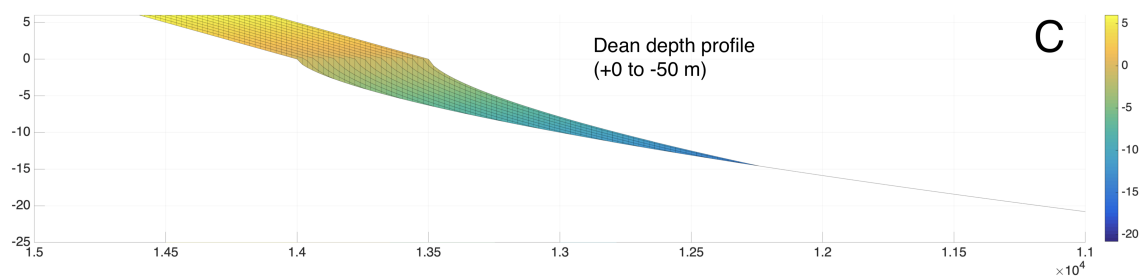


Figura 3.3 Perfil inicial. La playa emergida inicial tiene un ancho de 1000 m y una cota de 6 m sobre el nivel medio del mar.

Las dimensiones en metros de la mega-regeneración se detallan en la Figura 3.4:

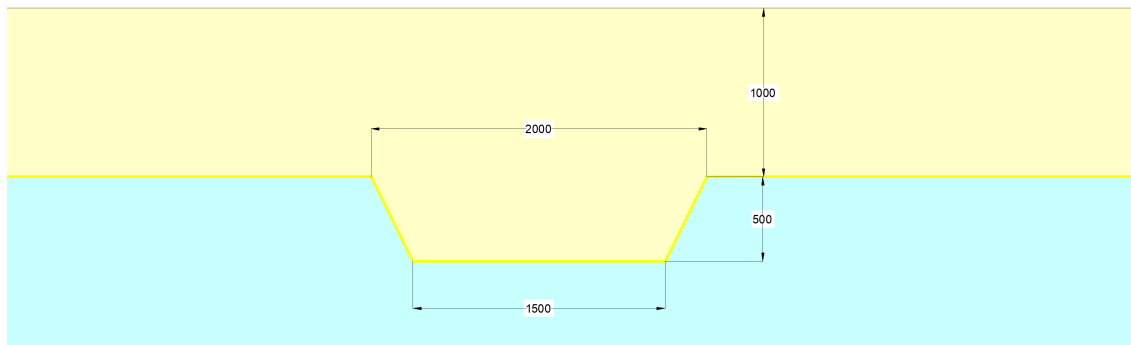


Figura 3.4 Perfil inicial. La playa emergida inicial tiene un ancho de 1000 m y 6 m sobre el nivel medio del mar.

Respecto a las combinaciones de clima se han empleado un total de 36 casos, cuyas diferencias se resumen en la Tabla 3.1

Tabla 3.1 Combinaciones de clima marítimo para cada una de las simulaciones..

Simulación	Amplitud Marea (m)	Dirección oleaje (°)	Período oleaje (s)	Altura de ola (m)
Caso 01	0.5	180	12	0.5
Caso 02	1	180	12	0.5
Caso 03	2	180	12	0.5
Caso 04	0.5	210	12	0.5
Caso 05	1	210	12	0.5
Caso 06	2	210	12	0.5
Caso 07	0.5	240	12	0.5
Caso 08	1	240	12	0.5
Caso 09	2	240	12	0.5
Caso 10	0.5	180	12	2
Caso 11	1	180	12	2
Caso 12	2	180	12	2
Caso 13	0.5	210	12	2
Caso 14	1	210	12	2
Caso 15	2	210	12	2
Caso 16	0.5	240	12	2
Caso 17	1	240	12	2
Caso 18	2	240	12	2
Caso 19	0.5	180	7	0.5
Caso 20	1	180	7	0.5
Caso 21	2	180	7	0.5
Caso 22	0.5	210	7	0.5
Caso 23	1	210	7	0.5
Caso 24	2	210	7	0.5
Caso 25	0.5	240	7	0.5
Caso 26	1	240	7	0.5
Caso 27	2	240	7	0.5
Caso 28	0.5	180	7	2
Caso 29	1	180	7	2
Caso 30	2	180	7	2
Caso 31	0.5	210	7	2
Caso 32	1	210	7	2
Caso 33	2	210	7	2
Caso 34	0.5	240	7	2
Caso 35	1	240	7	2
Caso 36	2	240	7	2

3.2 Modelo numérico de cálculo: Delft3D

Para la elaboración de este trabajo se ha empleado un modelo numérico de cálculo desarrollado por la Universidad de Delft (Delft University of Technology), denominado comercialmente Delft3D. Este software permite realizar simulaciones de corrientes, mareas, oleaje, transporte de sedimentos, calidad del agua y ecología. Está compuesto por diversos módulos unificados bajo una misma interfaz de usuario que son capaces de interactuar entre sí. En este trabajo se van a usar los módulos Wave y Flow. El módulo Wave simula la propagación de oleaje desde aguas profundas hacia la costa considerando las condiciones de contorno indicadas por el usuario. El módulo Flow permite analizar las condiciones hidrodinámicas (velocidades, elevación del nivel del mar, densidad, salinidad, etc...) así como el transporte de sedimentos (longitudinal y transversal) y por tanto los cambios morfológicos en la franja litoral.

3.2.1 Módulo Wave

Tal y como se recoge en [Pila, 2018], el módulo Wave simula la propagación del oleaje desde aguas profundas hasta aguas someras, mediante el uso del modelo SWAN (Simulation Waves Nearshore). Este modelo nos permite obtener las propiedades del oleaje cuando se aproxima a la costa. Algunos de los procesos que permite simular SWAN se recogen en el siguiente listado:

- Aumento del nivel como consecuencia de la rotura del oleaje (setup).
- Shoaling.
- Refracción.
- Difracción.
- Transmisión, bloqueo o reflexión del oleaje en presencia de obstáculos.
- Generación de oleaje producido por el viento.
- Disipación de energía por whitecapping (descrestamiento), rotura por profundidad y fricción con el fondo (mediante 3 formulaciones distintas).
- Interacciones no lineales ola-ola y ola-corriente.

De acuerdo con [Whitham, G (1974). Linear and nonlinear waves. Wiley], en Swan, el oleaje se describe mediante el espectro bidimensional de densidad de acción $N(\sigma, \theta)$ en lugar del espectro de densidad de energía $E(\sigma, \theta)$. Es por ello, que la evolución de la energía del oleaje se describe por la ecuación espectral de balance de la acción, $N(\sigma, \theta)$, a partir de condiciones arbitrarias de corrientes, viento y batimetría; siendo σ la frecuencia y θ la dirección de propagación. Esto es debido a que, en presencia de corrientes, la densidad de acción se conserva mientras que la densidad de energía no.

La densidad de acción es igual a la densidad de energía dividida por la frecuencia relativa:

$$N(\sigma, \theta) = \frac{E(\sigma, \theta)}{\sigma} \quad (3.1)$$

En su forma general la ecuación de conservación de la acción se presenta de la siguiente forma:

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial (C_x N)}{\partial x} + \frac{\partial (C_y N)}{\partial y} + \frac{\partial (C_\sigma N)}{\partial \sigma} + \frac{\partial (C_\theta N)}{\partial \theta} = \frac{S}{\sigma} \quad (3.2)$$

El primer término de la izquierda representa la evolución local a lo largo del tiempo de la densidad de la acción local. El segundo y el tercero representan la propagación de $N(\sigma, \theta)$ en el espacio geográfico (con velocidad de propagación C_x y C_y). El cuarto término representa los cambios de la frecuencia relativa debido a las variaciones de la batimetría y las corrientes (siendo C_σ la velocidad de propagación en el espacio σ). El quinto de ellos es la refracción del oleaje producida por los cambios de profundidad y corrientes (con velocidad de propagación C_θ en el espacio θ).

El término de la derecha ($S = S(\sigma, \theta)$) es el término de fuente de energía y es representado como la superposición de varios términos fuente:

$$S = S_{in} + S_{nl} + S_{ds,w} + S_{ds,br} + S_{ds,b} \quad (3.3)$$

Siendo:

- S_{in} : transferencia de energía al oleaje debida al viento.
- S_{nl} : interacciones no lineales entre olas.
- $S_{ds,w}$: disipación de energía en aguas profundas debidas al whitecapping.
- $S_{ds,br}$: término debido a la rotura por disminución de la profundidad.
- $S_{ds,b}$: disipación de energía por fricción con el fondo.

3.2.2 Módulo Flow

El módulo Flow es el motor de cálculo que proporciona la base hidrodinámica al resto de módulos de Delft3D. Permite conocer los cambios morfológicos que ocurren en la franja litoral teniendo en cuenta los siguientes procesos físicos:

- Presión atmosférica sobre la superficie del mar variable tanto en el espacio como en el tiempo.
- Efecto Coriolis por la rotación de la tierra.

- Variaciones en la densidad del agua del mar.
- Fuerzas generadas por las mareas.
- Efectos producidos por la tensión cortante que genera el viento sobre la superficie libre del mar.
- Esfuerzos cortantes sobre el fondo.

Este trabajo de fin de máster aplica un modelo basado en procesos descritos por [Lesser et al., 2004] en el que se puede encontrar una descripción detallada de las ecuaciones hidrodinámicas aplicadas, los aspectos numéricos y algunos ejemplos prácticos. Sin embargo, el trabajo de [Lesser et al., 2004] está enfocado a hacer una descripción del modo 3-D, aunque también incluye una comparación del modelo 2-D (profundidad promediada) y el 3-D para algunos casos de estudio. En las siguientes secciones se describirán las características principales del modelo. Primero, se describen las ecuaciones hidrodinámicas que gobiernan el modelo y, en segundo lugar, las formulaciones que describen el transporte de sedimentos y la actualización del nivel del lecho.

3.2.2.1 Modelo hidrodinámico

El modelo hidrodinámico es bidimensional y no estacionario y está basado en las ecuaciones de aguas someras (shallow water equations), en las que se elimina la velocidad vertical. Despreciando la influencia de la fuerza de Coriolis, las diferencias de densidad, el viento y las ondas, la ecuación de continuidad bidimensional y las ecuaciones de momento quedan de la siguiente forma:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{v}}{\partial y} = 0 \quad (3.4)$$

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + C_f \frac{\bar{u} \sqrt{\bar{u}^2 + \bar{v}^2}}{h} - \nu_e \left(\frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial y^2} \right) = 0 \quad (3.5)$$

$$\frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + \bar{v} \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \bar{u} \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} + g \frac{\partial \zeta}{\partial y} + C_f \frac{\bar{v} \sqrt{\bar{u}^2 + \bar{v}^2}}{h} - \nu_e \left(\frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial y^2} \right) = 0 \quad (3.6)$$

con:

$$C_f = g \frac{n^2}{\sqrt[3]{h}} \quad (3.7)$$

donde:

ζ : altura de lámina de agua respecto al NMM, m;
 h : profundidad de agua respecto a la batimetría, m;
 \bar{u} : velocidad promediada en la profundidad en dirección x, m/s;
 \bar{v} : velocidad promediada en la profundidad en dirección y, m/s;
 g : aceleración de la gravedad, m^2/s
 n : coeficiente de Manning, $sm^{-1/3}$
 ν_e : viscosidad, m^2/s
 C_f : coeficiente de fricción;

3.2.2.2 Modelo morfodinámico

El campo de velocidad obtenido al resolver la ecuación de continuidad y las ecuaciones de momento se utiliza para calcular el campo de transporte de sedimentos. En la literatura están disponibles varias formulaciones de transporte de sedimentos.

En este trabajo se usa una formulación de transporte relativamente simple sin hacer distinción entre carga suspendida y carga de cama. Por lo tanto, los resultados podrían analizarse de manera más directa.

Se hace uso de la fórmula de transporte de sedimentos total instantánea desarrollada por Engelund y Hansen [1967] que relaciona la velocidad directa y localmente con un transporte de sedimentos:

$$S = S_b + S_s = \frac{0.05U^2}{\sqrt{gC^3\Delta^2D_{50}}} \quad (3.8)$$

donde:

S magnitud del transporte de sedimento, m^3/ms ;
 S_b magnitud del transporte por fondo, m^3/ms ;
 S_s magnitud del transporte en suspensión, m^3/ms ;
 U magnitud de la velocidad de la corriente m/s ;
 Δ densidad relativa $(\rho_s - \rho_w)/\rho_w$;
 C factor de fricción definido por $\frac{\sqrt{h}}{n}$, $m^{1/2}/s$;
 n coeficiente de Manning, $sm^{-1/3}$
 D_{50} tamaño medio de grano, m

3.3 Implementación del modelo numérico de cálculo

En este apartado se van a describir los parámetros que definen el modelo numérico que se utilizará para realizar la simulación de los 36 escenarios con Delft3D.

3.3.1 Malla o grid

En cualquier software elementos finitos es necesario mallar el dominio, con objeto de que pasemos de tener infinitas incógnitas a tener un número finito N de incógnitas. En este trabajo se va a discretizar el dominio en un número concreto de celdas cuadradas, sobre las que se van a resolver las ecuaciones.

Mientras mayor sea la resolución espacial, es decir, mientras más celdas de menor tamaño empleemos, más precisos serán los resultados, pero también se elevará el coste computacional. Por tanto, el objetivo es optimizar el tamaño de celda para que la solución sea lo suficientemente buena y el coste computacional el menor posible.

Consideremos también que el objetivo final es conocer cómo evoluciona la posición del sedimento en la zona de la regeneración y sus proximidades. Por tanto, resulta interesante emplear celdas de menor tamaño en las cercanías a la regeneración y celdas de mayor tamaño en las zonas más alejadas. De esta forma optimizamos el coste computacional. Asimismo, sabemos que a partir de la profundidad de cierre (en el modelo actual unos 14 m) no se moviliza sedimento, por tanto, no interesa que el modelo sea excesivamente detallado a partir de esas profundidades.

Por estos motivos se han definidos dos mallas: una malla interior de detalle (nest) que envuelve la regeneración y sus proximidades y una malla exterior más gruesa (coarse) que contienen a la anterior y completa el dominio de estudio. Las características se recogen en la Tabla 3.2:

Tabla 3.2 Características de las mallas usadas en el modelo.

	Malla Nest	Malla Coarse
Dimensiones (m)	11800 x 3840	69.800 x 14.800
Tamaño celda (m)	40 x 40	200 x 200
Número de celdas	301 x 96	349 x 74

Como podemos observar con los datos que ya poseemos, aunque que la regeneración tiene una longitud de unos 2000 m, analizaremos los cambios morfológicos a lo largo de 11800 m de costa para ver los efectos que la regeneración ha provocado.

En la Figura 3.5 se muestra la malla nest discretizada. El mapa de colores representa las profundidades asociadas a la malla (los valores negativos de la profundidad indican que el punto se encuentra situado por encima del nivel medio del mar):

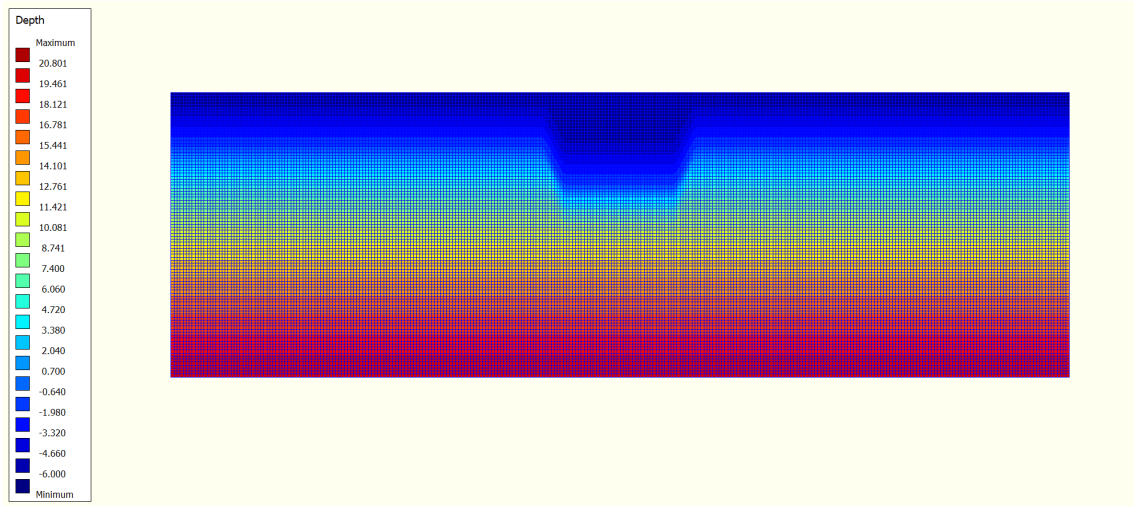


Figura 3.5 Malla nest discretizada con mapa de colores de batimetría.

Con el objetivo de que la solución obtenida sea continua es necesario anidar ambas mallas en el contorno de contacto. Esto ocurre en el borde exterior de la malla nest. Dado que las condiciones de contorno de oleaje se van a aplicar manualmente sólo en los bordes de la malla coarse, el anidado resulta un paso fundamental para que el software sea capaz de interpolar unas condiciones de contorno de oleaje válidas para la malla nest. Esto va a permitir que los errores que aparezcan por el forzamiento de las condiciones de contorno en la malla coarse se amortigüen paulatinamente y alcancen con el menor error posible nuestra zona de estudio de detalle.

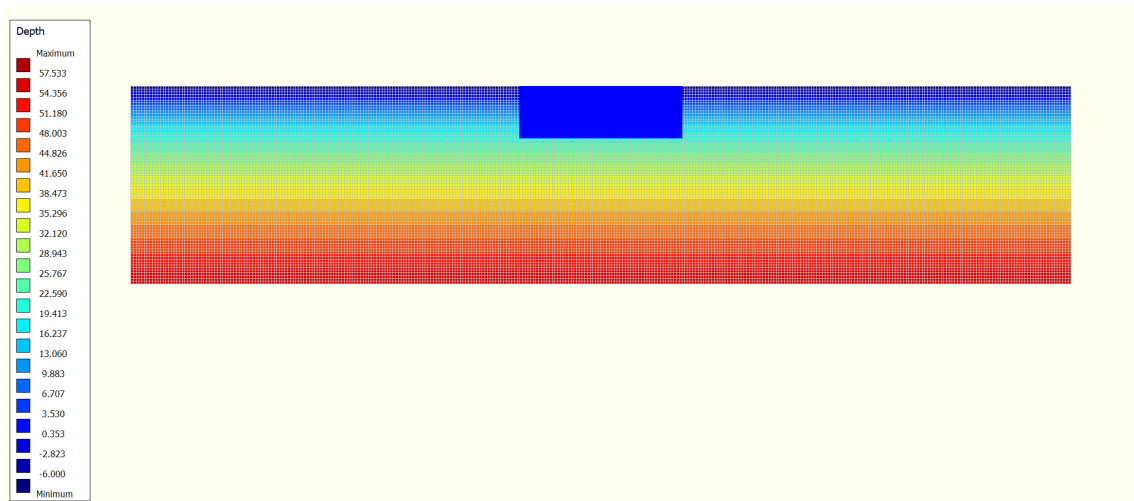


Figura 3.6 Anidado de las mallas coarse y nest.

3.3.2 Implementación de los módulos Wave y Flow

En este apartado se van a exponer algunas consideraciones importantes sobre los módulos Wave y Flow. El módulo Wave realiza la propagación del oleaje desde aguas profundas hacia la costa. Por tanto, este módulo es de aplicación a las mallas nest y coarse. Por otro lado, el módulo Flow es el encargado de realizar los cálculos hidrodinámicos (corrientes, movilización del sedimento) y sólo será de aplicación a la malla coarse, que es la zona donde nos interesa conocer los cambios morfológicos.

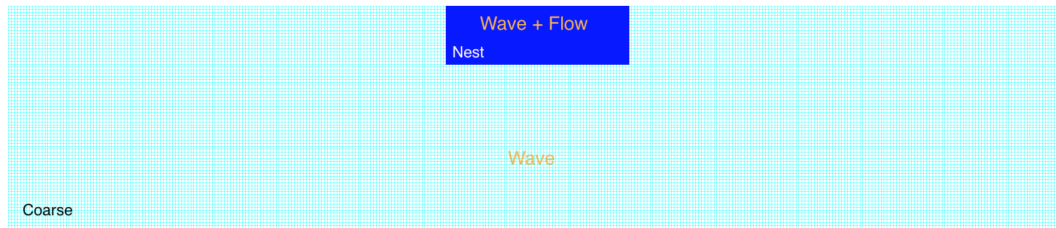


Figura 3.7 Anidado de las mallas coarse y nest.

Centrándonos en los detalles del módulo Wave, hay que destacar:

- Se ha usado un coeficiente γ de valor 0.73 para rotura por fondo (ByJ model).
- Para la fricción por fondo se ha empleado la formulación de Jonswap, con un coeficiente del espectro de $0,067 \text{ m}^2/\text{s}^3$.
- La densidad de agua oceánica se ha fijado en 1025 kg/m^3 .
- Delft3D permite modificar algunos aspectos muy relevantes del espectro bidireccional de densidad de acción de onda. Se ha fijado una discretización del espacio direccional de 36 subdivisiones del círculo de direcciones espectrales.
- El espacio de frecuencia se ha establecido entre los límites 0,05 Hz y 1 Hz, con un total de 24 divisiones.

Respecto al módulo Flow, destacamos:

- Se ha situado el modelo físico en una latitud de 0 grados (Ecuador).
- El time step se ha elegido de manera que el número de Courant tenga un valor adecuado. Este apartado explicará detalladamente más adelante, ya que también han intervenido otros factores a la hora de su elección.
- En el instante $t = 0$, se considera que el nivel del mar se encuentra en la cota 0.00 m.
- Los resultados de cálculo se exportan cada 60 minutos.
- Se ha elegido un factor de aceleración morfológica igual a 40.

3.3.3 Condiciones de contorno (oleaje)

Tal y como se explicó en apartados anteriores, las condiciones de contorno de oleaje sólo se van a imponer manualmente en los bordes de la malla coarse. En la malla nest se obtendrán las condiciones de contorno por interpolación. Además, sólo se aplicarán a los bordes abiertos, es decir aquellos bordes por los que puede entrar el oleaje. Esto ocurre en todas las celdas que tienen asociada una profundidad positiva. En la Figura 3.8 se identifican los bordes abiertos con condiciones de contorno de oleaje impuestas:

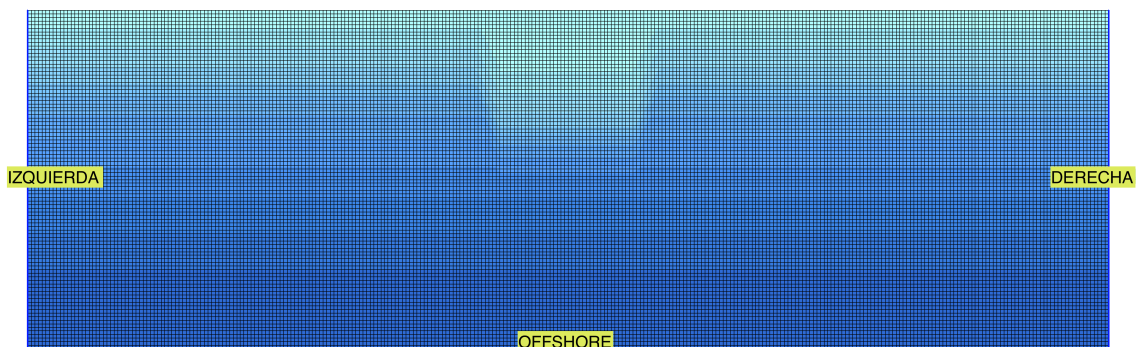
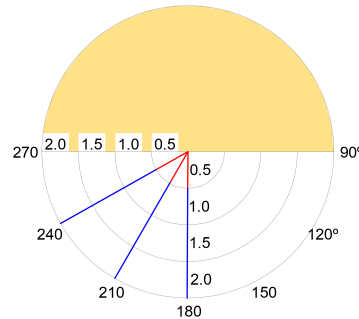


Figura 3.8 Condiciones de contorno de oleaje en la malla coarse.

Son un total de 3 bordes, denominados: Izquierda, Derecha y Offshore sobre los que las variables de oleaje pueden tomar el siguiente rango de valores:

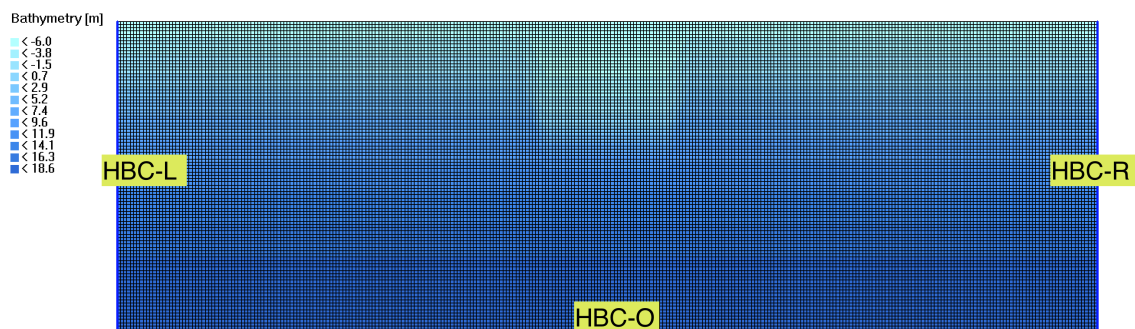
Tabla 3.3 Rango de condiciones de contorno de oleaje.

	Rango de valores
Altura de ola significativa (m)	0.5 - 2
Período pico (s)	7 - 12
Dirección del oleaje (°)	180 - 210 - 240

**Figura 3.9** Rosa de oleaje.

3.3.4 Condiciones de contorno (hidrodinámicas)

Las condiciones de contorno hidrodinámicas son de aplicación en los bordes abiertos de la malla nest, que es donde actúa el módulo Flow. Dichos bordes se han denominado HBC-L, HBC-R y HBC-O y se muestran en la Figura 3.10:

**Figura 3.10** Condiciones de contorno hidrodinámicas en la malla nest.

Las condiciones de contorno hidrodinámicas variarán en función de la simulación de interés y además son diferentes en función del borde en el que están siendo aplicadas. Se distinguen por tanto dos tipos de condiciones hidrodinámicas distintas

Condiciones de contorno hidrodinámicas tipo Water Level:

Consisten en imponer un forzamiento de la marea en el borde sobre el que actúa. En este trabajo de fin de máster se ha considerado únicamente una componente para describir la marea astronómica de las 390 que tienen en la realidad. Concretamente se ha usado la componente S_2 , cuyas características se detallan en la Tabla 3.4

Tabla 3.4 Condición de contorno tipo Water Level en contorno HBC-O .

Notación	Amplitud (m)	Fase (°)	Período (h)	Descripción
S_2	0.5 - 1 - 2	30	12	Marea astronómica

La condición Water level solo se ha impuesto en el contorno HBC-O, es decir, el borde abierto paralelo a

la línea de costa.

Condiciones de contorno hidrodinámicas tipo Neumann:

Las condiciones de contorno tipo Neumann imponen una velocidad del fluido perpendicular a la dirección del borde en el que están siendo aplicadas, mediante un forzamiento tipo time-series.

Esta condición se ha aplicado en los bordes HBC-L y HBC-R, dándole un valor de cero al forzamiento time-series durante toda la simulación.

3.3.5 Fricción

Cuando se impone una condición de contorno hidrodinámica en un contorno determinado se generan unas corrientes que distorsionan la solución real, introduciendo elevados errores.

En el modelo que se desarrolla en este trabajo se han impuesto sobre los contornos denominados “Izquierda” y “Derecha” unas condiciones de flujo tipo Neumann, que imponen un forzamiento de tipo Time Series de valor 0. Esto genera en el modelo una corriente longitudinal de gran magnitud que distorsiona la solución. Para reducir las elevadas velocidades que se producen en los citados contornos, se propone aumentar la fricción en las celdas más próximas a los bordes “Izquierda” y “Derecha”.

Se empleará el coeficiente de Chézy para asignar un valor de fricción a cada celda. El coeficiente de Chézy (C) es inversamente proporcional a la fricción, por tanto, se comenzará con valor bajo de dicho coeficiente (10) y se irá incrementando linealmente hasta alcanzar el valor necesario (65). Esta transición de los valores de C se realiza en una longitud de 500 m. La Figura 3.11 muestra la variación de C en la malla nest.

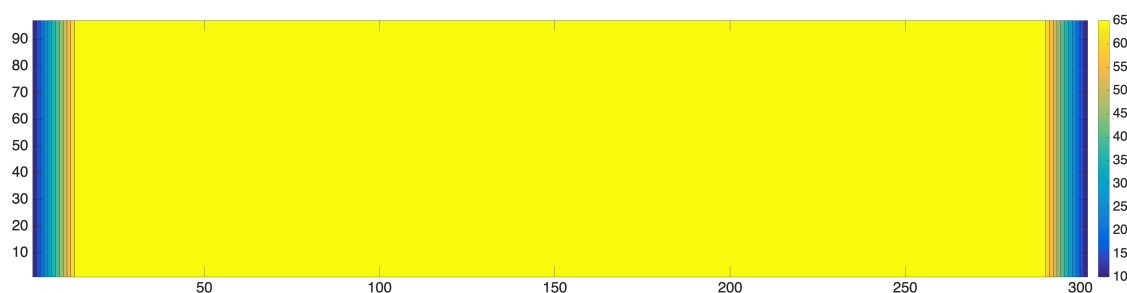


Figura 3.11 Variación del coeficiente de rugosidad de Chézy (C) a lo largo de la malla nest.

3.3.6 Definición del sedimento

Para poder definir el modelo es necesario determinar las propiedades del sedimento nativo y del sedimento de aportación. En este trabajo vamos a centrarnos en analizar qué ocurre con los sedimentos de tipo no cohesivo, es decir aquellos en los que las partículas no tienden a juntarse ni adherirse y son relativamente grandes, puesto que son estos los que más frecuentemente encontramos en las costas. Dentro de los no cohesivos, vamos a quedarnos con las arenas, que son aquellos que tienen un diámetro medio comprendido entre los 100 μm y los 2000 μm .

Como se expuso en apartados anteriores, el encargado de simular el transporte de sedimentos y los cambios morfológicos es el módulo Flow, que sólo actúa en la malla nest. Por tanto, sólo será necesario definir las propiedades del sedimento dentro de dicha malla. Además, vamos a considerar que el sedimento tiene unas propiedades constantes, las cuales se resumen en la Tabla 3.5 :

Tabla 3.5 Propiedades de los sedimentos.

	Nativo	Aportación
Densidad específica	2650 kg/m^3	2650 kg/m^3
Diámetro medio (D_{50})	200 μm	300 μm

Dentro de la malla nest, que recordemos tenía unas dimensiones de 301 x 96 celdas (40 m), se va a definir un espesor inicial de la capa de sedimento en el fondo de 5 m. Será necesario indicar al software en qué zonas se encuentra el sedimento nativo y en cuáles el de aportación. Es precisamente esto lo que se pretende ilustrar

con los dos siguientes gráficos. El color morado representa que no existe sedimento y el amarillo indica un espesor de 5 m de sedimento. Si sumásemos ambos gráficos, obtendríamos que el espesor de sedimento a lo largo de todo el dominio es homogéneo y de valor 5 m.

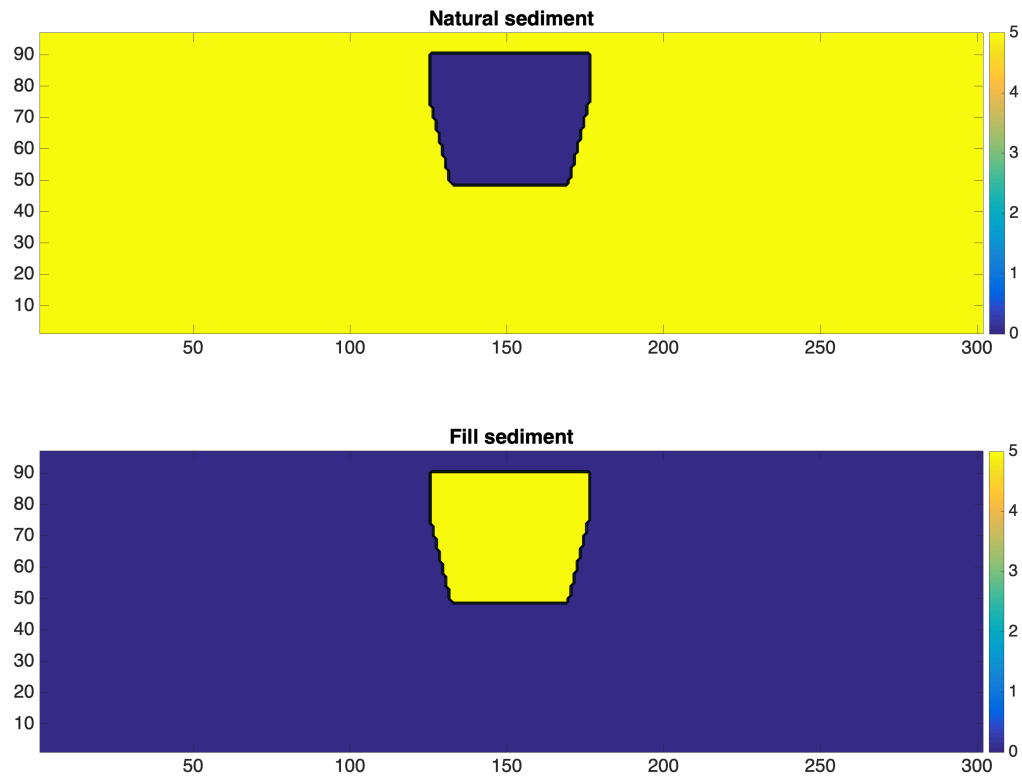


Figura 3.12 Espesor del sedimento nativo y de aportación en el dominio.

3.3.7 Morfología

Dentro del programa Delft3D existe una pestaña denominada “morphology” que nos permite definir los valores de una serie de variables. Dichas propiedades se han ido modificando hasta obtener una calibración adecuada de los modelos analizados.

En primer lugar, se ha indicado al modelo que actualice la batimetría durante la simulación y que imponga la concentración de contorno de equilibrio en los contornos.

Se ha empleado un factor de aceleración morfológica igual a 40. El factor de aceleración morfológica actúa como un multiplicador de los cambios morfológicos (transporte de sedimento) frente a unas condiciones de oleaje y marea concretos. Es decir, un día de simulación del modelo equivaldría a 40 días de cambios morfológicos. Esto permite reproducir unas condiciones futuras con un coste computacional bajo.

Para poder ejecutar un arranque en caliente del modelo se ha fijado el spin-up interval, tiempo a partir del cual comienzan los cambios morfológicos, de 12 horas.

El resto de los parámetros morfológicos se ha seleccionado teniendo en cuenta las publicaciones de artículos de otros autores, como es el caso de [Nienhuis et al., 2016], que realizan modelos similares al nuestro. Esto ha sido necesario porque no disponemos de datos de calibración reales.

3.3.8 Tiempo de simulación

El tiempo de simulación para cada uno de los modelos ha sido de 9 días, con un factor de aceleración morfológica igual a 40. Esto permite analizar los cambios morfológicos que tienen lugar a lo largo de un año natural. Los resultados han sido escritos en un fichero de salida cada 60 minutos. El coste computacional de cada simulación ha sido de aproximadamente 8,5 horas con un total de 36 simulaciones.

3.4 Análisis de sensibilidad del modelo

Este apartado se realiza con el objetivo de analizar la validez del modelo numérico y optimizar los tiempos de cálculo. Si un modelo numérico que emplea un tamaño de celda y un time step determinados arroja unos resultados coherentes, sabemos que si reducimos el tamaño de las celdas o el time step y sigue proporcionando los mismos resultados, entonces podemos decir que el modelo numérico se comporta bien y nos da cierta confianza. Asimismo, si aumentamos progresivamente el tamaño de celda (time step), sabemos que llegará un momento en el que los resultados proporcionados por el modelo se desvíen de los que veníamos observando, obteniéndose grandes errores. Esto último nos permite encontrar el tamaño de celda (time step) máximo que admite nuestro modelo y por tanto el que menor coste computacional tiene. Para conseguirlo se van a comparar las soluciones obtenidas diferentes en modelos cuyas únicas diferencias son las dimensiones de las celdas de la malla nest y el time step. La Tabla 3.6 recoge los casos analizados:

Tabla 3.6 Datos análisis de sensibilidad.

Tamaño celda malla nest	25 m	40 m	80 m
Time step del modelo	0.05 s	0.1 s	0.2 s

Influencia del tamaño de malla

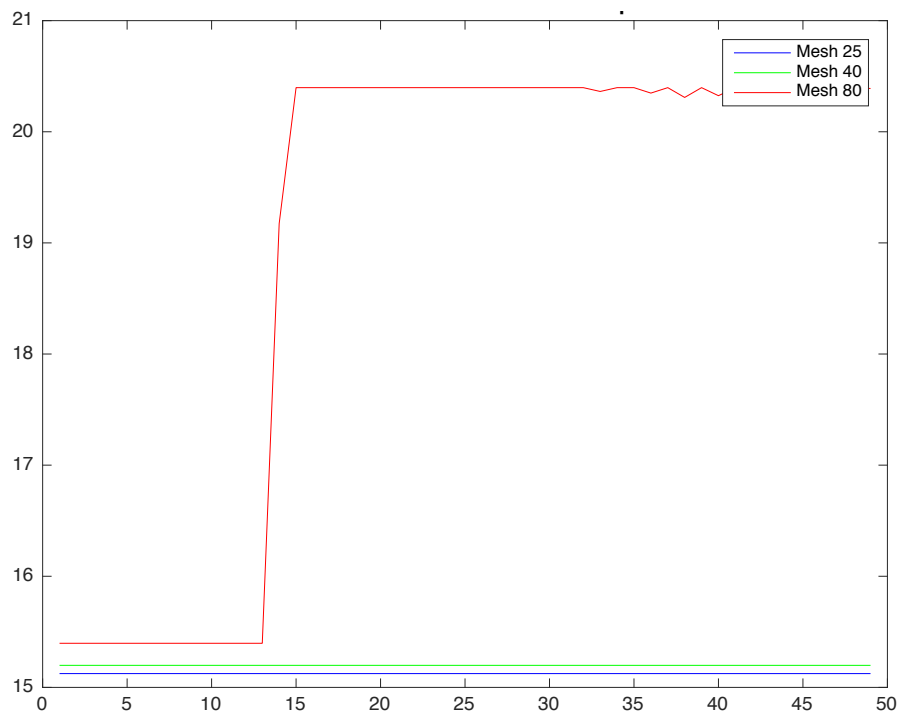


Figura 3.13 Bottom depth para diferentes tamaños de malla.

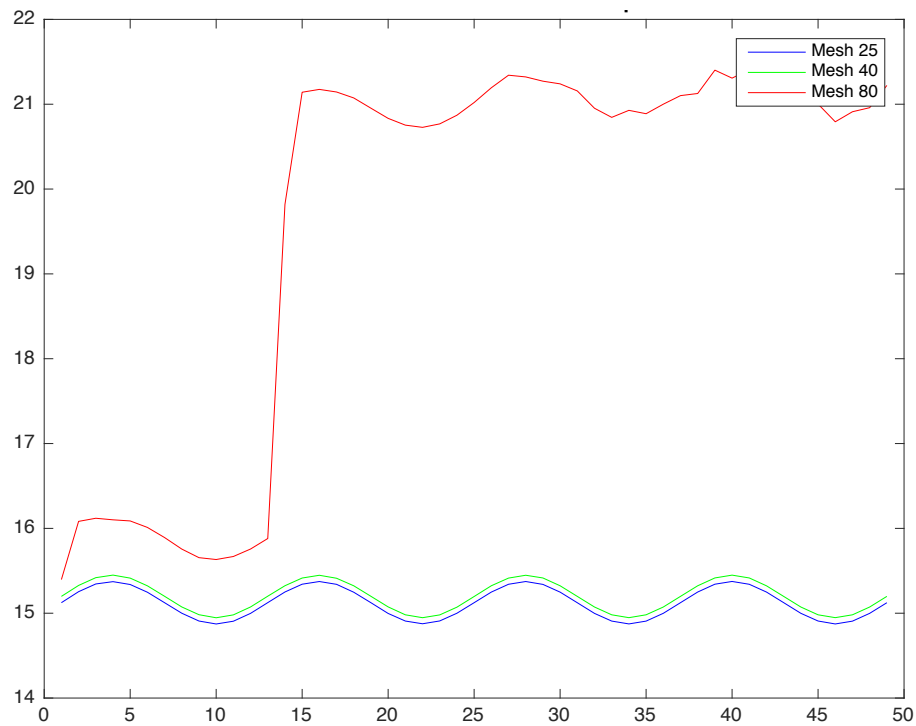


Figura 3.14 Water depth para diferentes tamaños de malla.

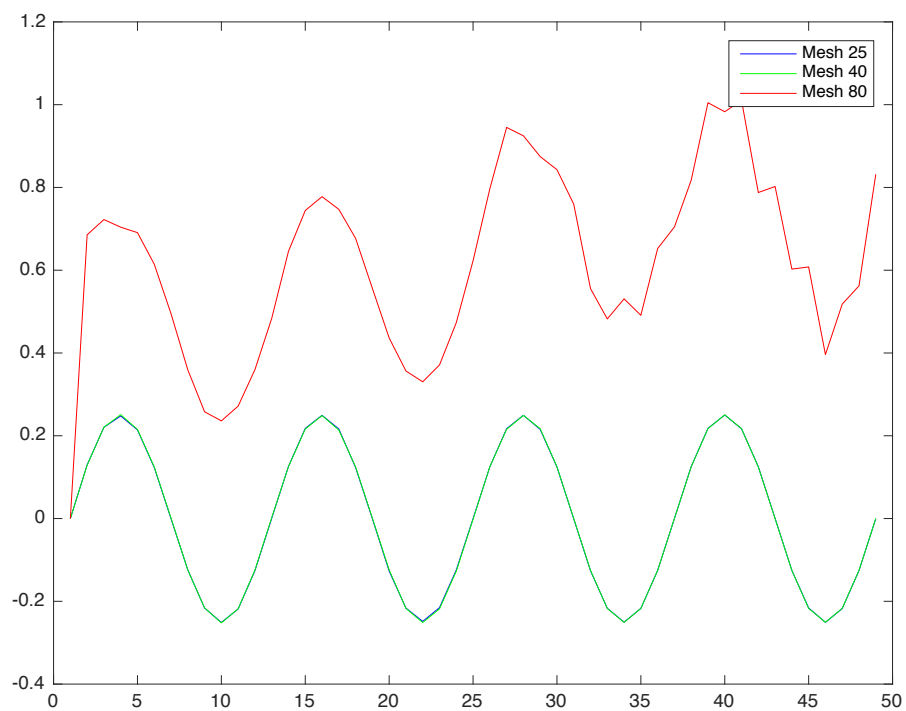


Figura 3.15 Water level para diferentes tamaños de malla.

Como se puede observar en las figuras 3.13, 3.14 y 3.15, al usar celdas de 25 y 40 m se obtienen resultados casi idénticos. Sin embargo, la celda de 80 m genera demasiado error. Concluimos que el tamaño óptimo de celda en nuestro modelo es de 40 m. El ahorro de coste computacional (en términos de tiempo) al usar la malla de 40 m respecto a la de 25 m es de un 40%.

Influencia del Time Step

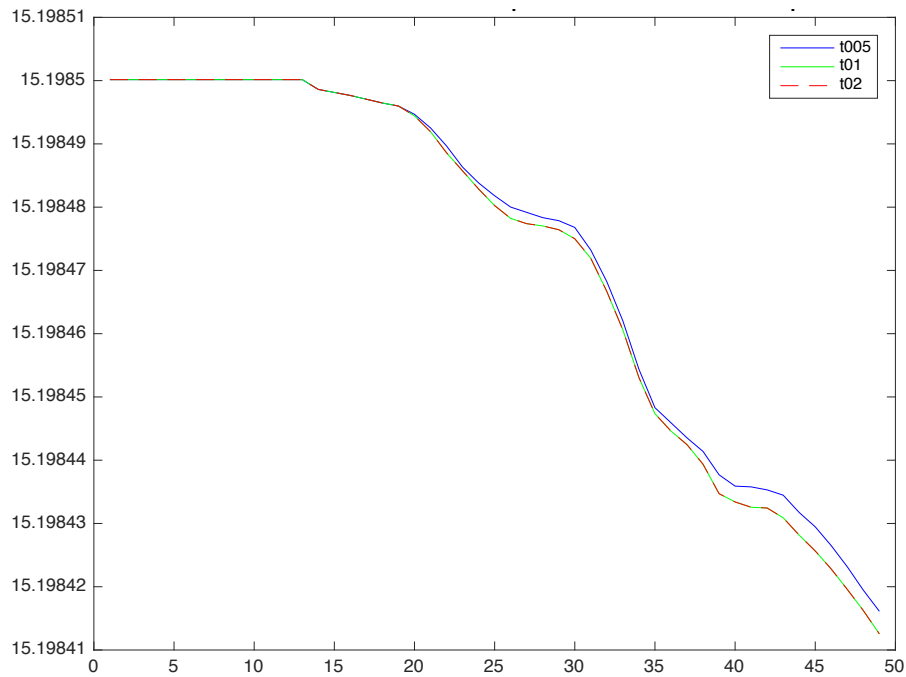


Figura 3.16 Bottom depth para diferentes time step.

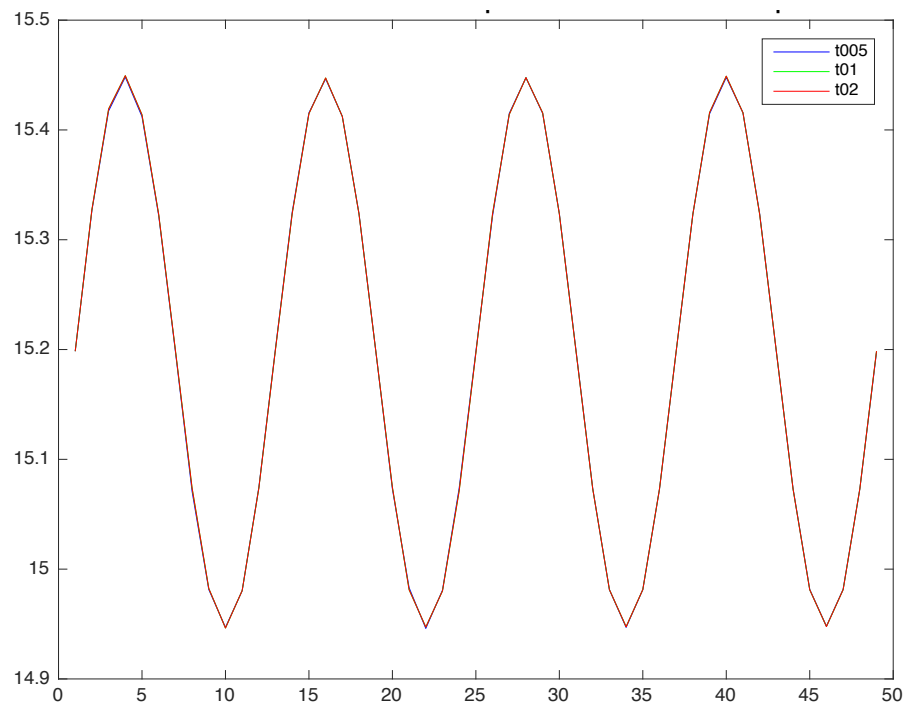


Figura 3.17 Water depth para diferentes time step.

Como se puede observar en las figuras 3.16 y 3.14, todos los time step arrojan los mismos resultados. No se han comprobado time step mayores porque el número de Courant que se obtenía era demasiado elevado y ya sabíamos que induciría a errores tarde o temprano. De acuerdo con los resultados obtenidos en este

apartado, el time step que minimiza el coste computacional es 0.2 s.

Considerando que los resultados obtenidos son prácticamente idénticos al usar celdas de 25 m y 40 m, así como time step de 0.05 s, 0.1 s y 0.2 s, podemos concluir que el modelo numérico es válido y nos ofrece ciertas garantías respecto a su funcionamiento.

Influencia del factor de aceleración morfológica

Adicionalmente al análisis que acabamos de realizar, se decidió ver la influencia que el factor de aceleración morfológica tenía en los resultados. Para ello se va a analizar la posición de la línea de costa y la geometría de un perfil para diferentes valores de dirección del oleaje, tiempo y factor de aceleración morfológica.

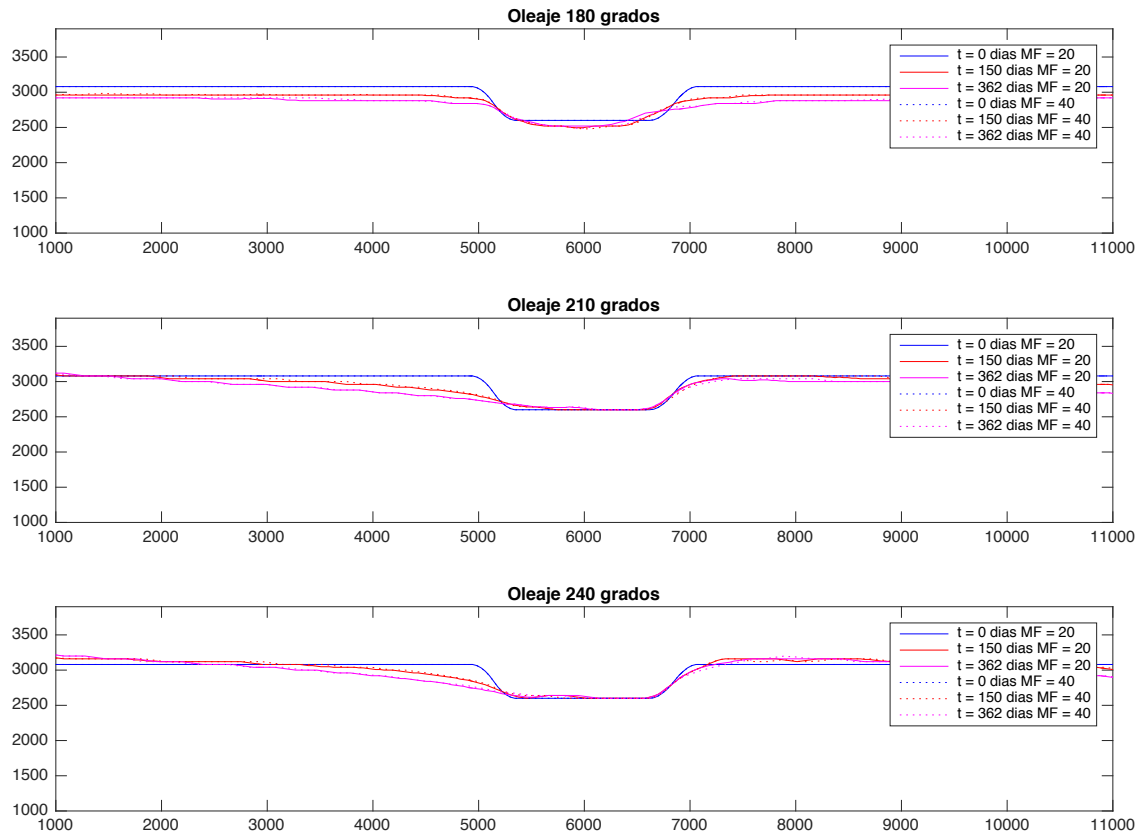


Figura 3.18 Water depth para diferentes time step.

De la Figura 3.18 se concluye que emplear un factor de aceleración morfológica igual a 40 y un tiempo de simulación de 9 días arroja los mismos resultados que emplear un factor de aceleración morfológica igual a 20 y un tiempo de simulación de 4,5 días. En ambos casos el tiempo de simulación morfológica total sería de 1 año. Vemos que esto se verifica para los pasos de tiempo $t = 0$ días, $t = 150$ días y $t = 362$ días. La Tabla 3.7 recoge los casos mencionados:

Tabla 3.7 Comparación resultados para diferentes valores del factor de aceleración morfológica.

Dirección oleaje	MF	t simulación	t real
180 - 210 - 240	20	9 días	1 año
180 - 210 - 240	40	5 días	1 año

Al analizar una sección transversal de la línea de costa (perfil), obtenemos las mismas conclusiones que acabamos de comentar respecto a la posición de la línea de costa. Puede visualizarse en la Figura 3.19

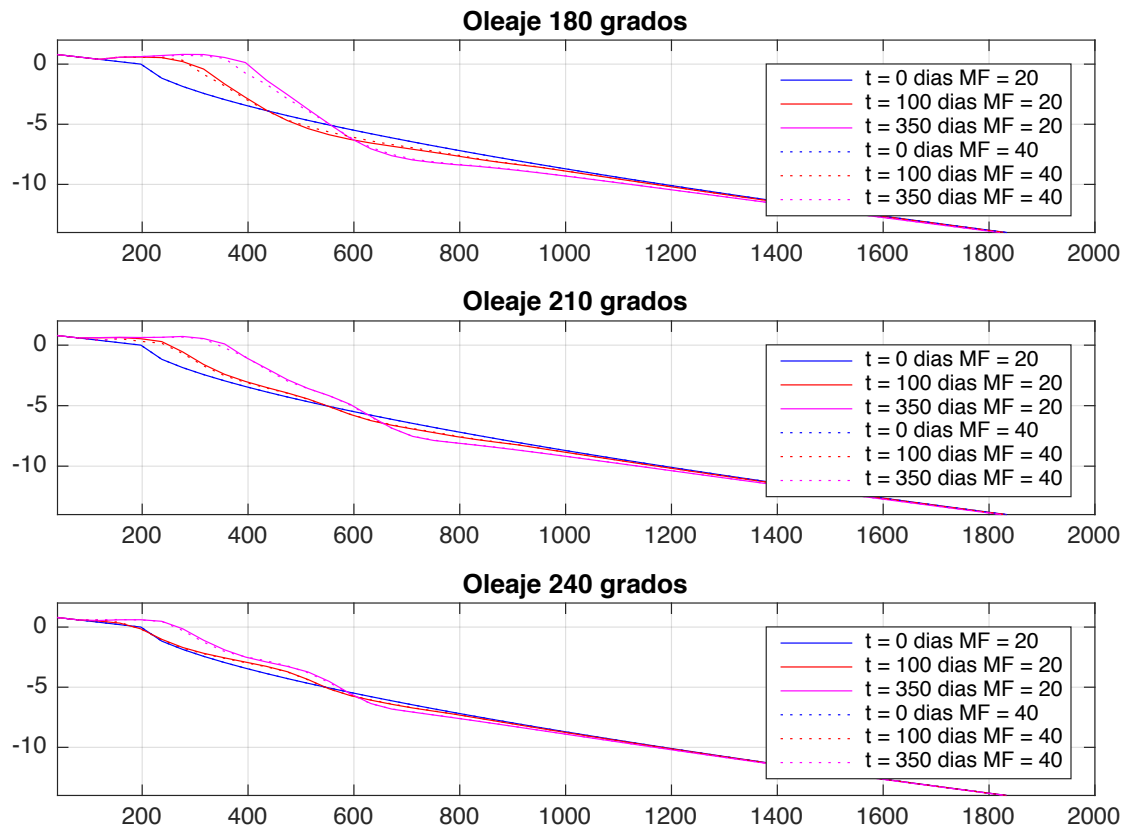


Figura 3.19 Water depth para diferentes time step.

4 Resultados

En este capítulo se recoge un análisis comparativo de los resultados obtenidos tras ejecutar las 36 simulaciones con Delft3D. Se pretende con ello evaluar detalladamente los cambios morfológicos de la costa. El capítulo se estructura en tres pilares fundamentales:

1. Analizar la influencia que cada variable independiente tiene sobre: la evolución de la posición de la línea de costa, el ancho medio de playa seca, la geometría del perfil de equilibrio alcanzado y los volúmenes de sedimento movilizados.
2. Realizar un análisis multivariable en el que se estudie la influencia que la combinación de 2 variables independientes pueden tener sobre el ancho medio de playa seca al final de la simulación.
3. Realizar una clasificación de algunos perfiles de la playa en función de la evolución que haya sufrido su geometría

El análisis de los resultados se ha limitado a las zonas próximas a la regeneración. Esta zona se corresponde con el interior de la malla nest, que recordemos tenía una longitud de 12 km y un ancho de 4 km. En la Figura 4.1 se muestra la batimetría en la zona de estudio.

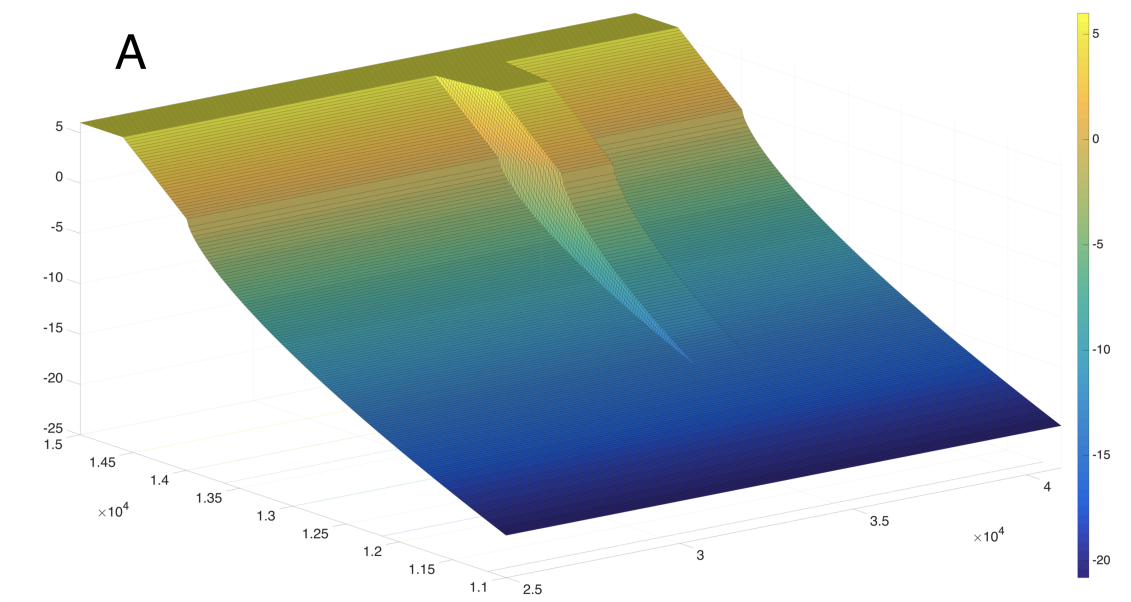


Figura 4.1 Representación 3D de la batimetría generada con Matlab.

En último lugar, antes de centrarnos en el análisis, recordemos que las 36 simulaciones realizadas se distinguen únicamente en los valores de entrada de las variables que se recogen en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1 Posibles valores de las variables independientes.

Dirección oleaje	Hs (m)	Tp (s)	Amplitud de marea (m)
180 - 210 - 240	0.5 - 2	7 - 12	0.5 - 1 - 2

Destacar también que a lo largo del presente capítulo se hace mención a diferentes perfiles analizados. En la Figura 4.2 se muestran el dominio de análisis, que se corresponde con el interior de la malla nest, y en él se detallan la posición y denominación de los perfiles que se van a analizar:

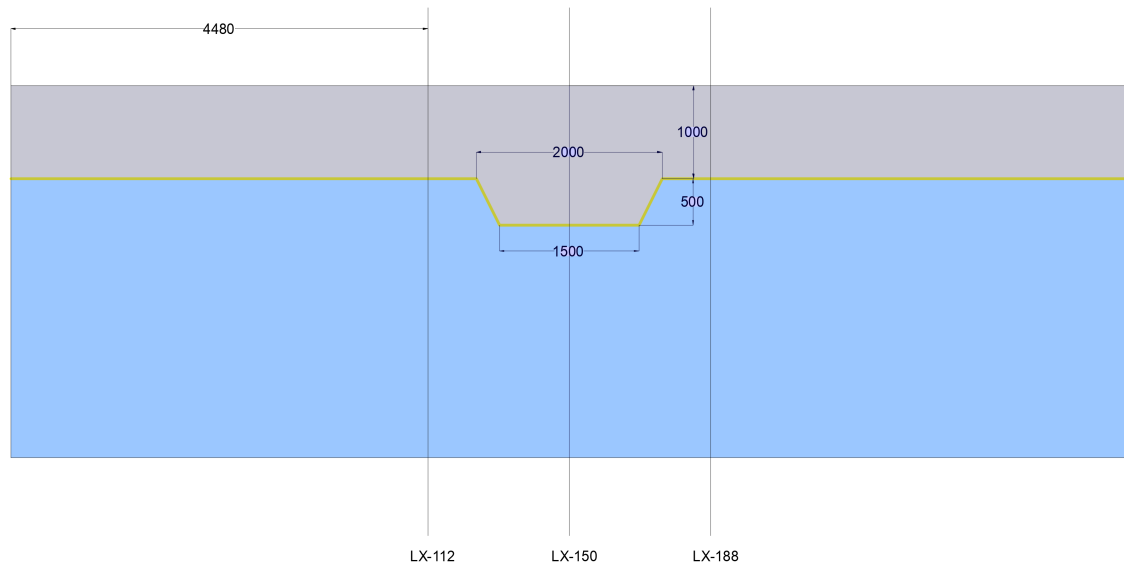


Figura 4.2 Posición y denominación de los perfiles que se van a analizar.

En este apartado y en los sucesivos, se emplea el concepto de **ancho medio de playa seca**, refiriéndonos al ancho de playa seca promediado en todo el dominio de estudio de la malla nest. Observando la Figura 4.2, el ancho medio de playa seca sería el ancho promedio de toda la zona representada en color gris (playa seca). Para el instante inicial, este valor es de 788 m. Es importante recordar cómo está definido este concepto dado que se usará con frecuencia en el análisis de resultados y la obtención de conclusiones.

4.1 Análisis 1 variable de entrada

4.1.1 Influencia de la carrera de marea.

En este apartado se analiza la evolución de la posición de la línea de costa, manteniendo dirección, altura y período del oleaje constantes. En la Tabla 4.3 se recogen, a modo de resumen, los datos de entrada de los casos comparados:

Tabla 4.2 Datos de entrada más relevantes para el análisis de la influencia de la carrera de marea..

	Dirección oleaje	Hs (m)	Tp(s)	Amplitud marea (m)
Caso 19	180	0.5	7	0.5
Caso 20	180	0.5	7	1
Caso 21	180	0.5	7	2

Se muestran resultados tras 180 días y tras 360 días de simulación:

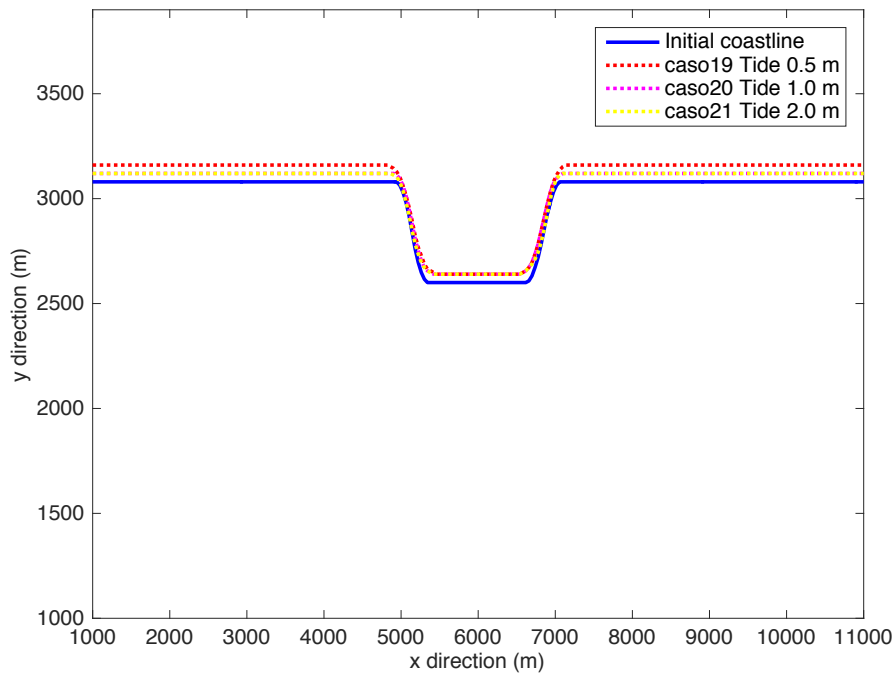


Figura 4.3 Posición de la línea de costa después de 180 días, para los casos 19, 20 y 21.

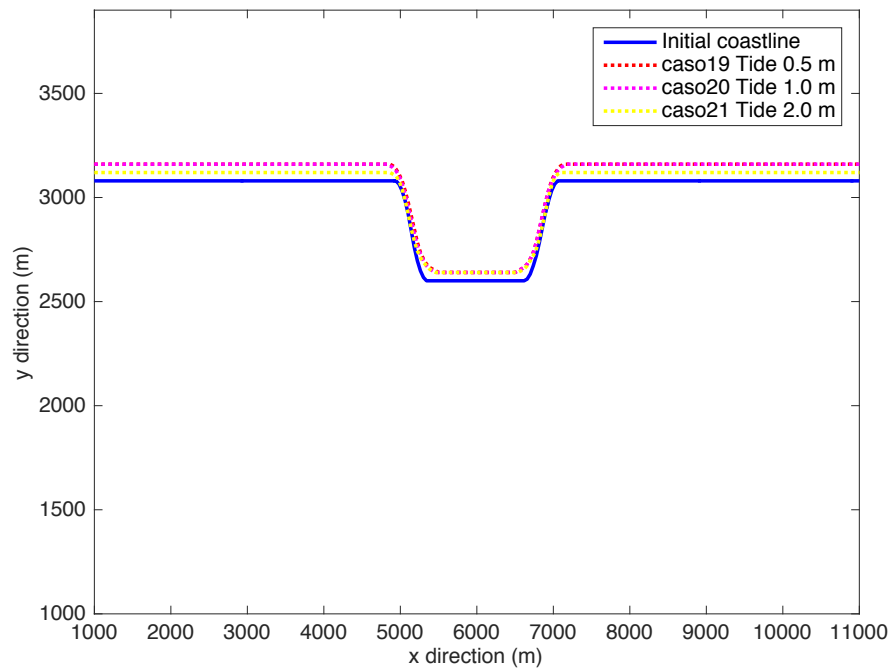


Figura 4.4 Posición de la línea de costa después de 360 días, para los casos 19, 20 y 21.

Conclusiones:

- El ancho medio de playa seca inicial es 788 m. En los 3 casos se produce un retroceso del ancho medio. Concretamente:
 - **Marea 0.5 m:** ancho final 714 m
 - **Marea 1 m:** ancho final 716 m
 - **Marea 2 m:** ancho final 748 m
- Se observa que carreras de marea mayores dan mayor ancho medio al final de la simulación.
- La geometría final es muy similar independientemente de la carrera de marea elegida.

4.1.2 Influencia de la dirección del oleaje.

En este apartado se analiza la evolución de la posición de la línea de costa, manteniendo carrera de marea, altura y período del oleaje constantes. En la Tabla 4.3 se recogen, a modo de resumen, los datos de entrada de los casos comparados:

Tabla 4.3 Datos de entrada más relevantes para el análisis de la influencia de la dirección del oleaje.

	Dirección oleaje	Hs (m)	Tp(s)	Amplitud marea (m)
Caso 19	180	0.5	7	0.5
Caso 22	210	0.5	7	0.5
Caso 25	240	0.5	7	0.5

Se muestran datos tras 180 días y tras 360 días:

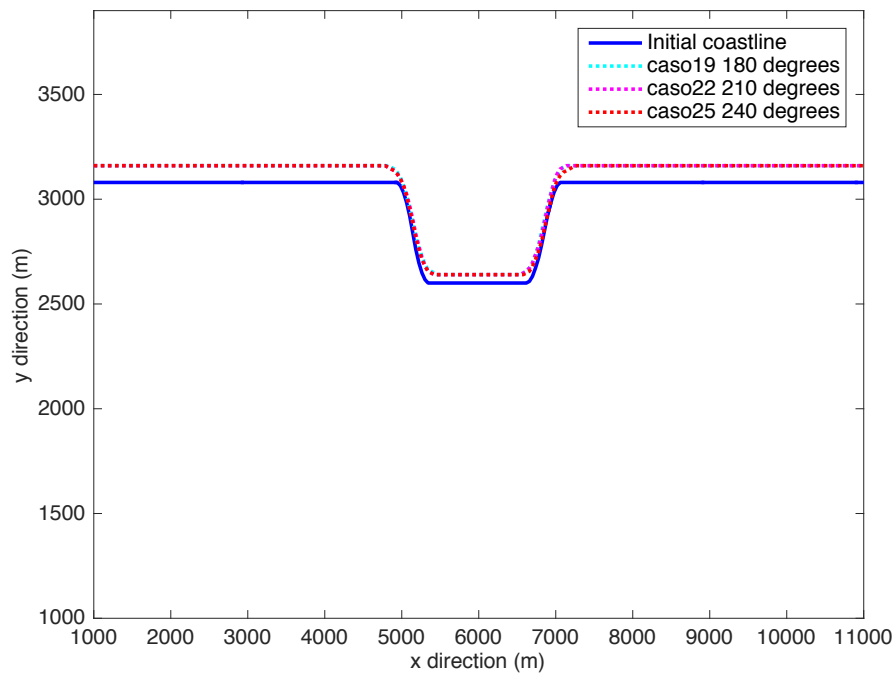


Figura 4.5 Evolución de la línea de costa después de 180 días. Amplitud de marea 0.5m, altura significativa 0.5m y período pico 7s.

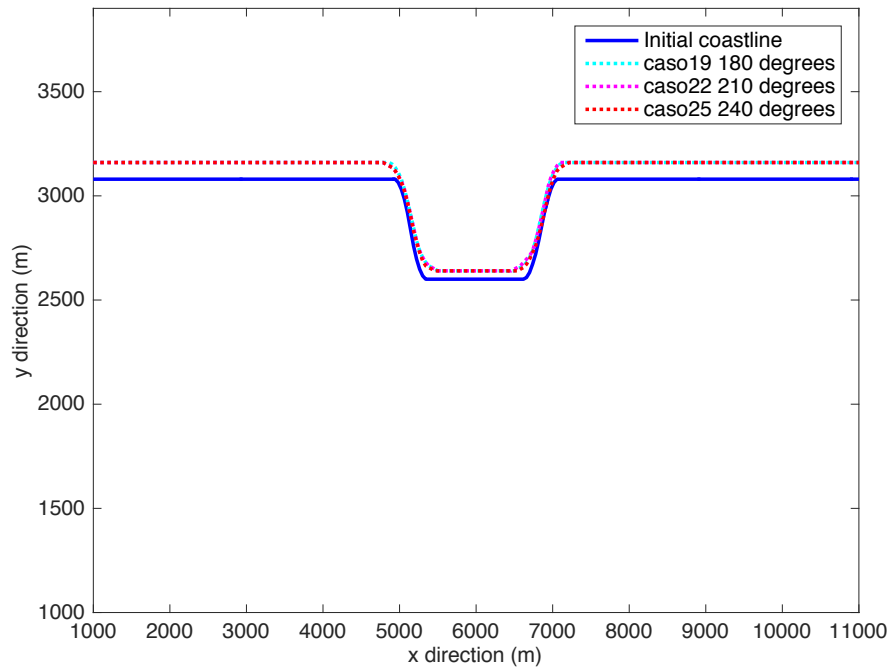


Figura 4.6 Evolución de la línea de costa después de 360 días. Amplitud de marea 0.5m, altura significativa 0.5m y período pico 7s.

Conclusiones:

- El ancho medio de playa seca inicial es 788 m. En los 3 casos se produce un retroceso del ancho medio. Concretamente:
 - **Oleaje 180 grados:** ancho final 714 m
 - **Oleaje 210 grados:** ancho final 714 m
 - **Oleaje 240 grados:** ancho final 716 m
- Nula influencia de la dirección en el ancho medio final
- La geometría final es casi idéntica independientemente de la dirección. Puede deberse a que la altura de ola es demasiado pequeña (0.5 m)

Sin embargo, si analizamos la influencia de la direccionalidad del oleaje cuando la carrera de marea y la altura de ola son relativamente grandes, sí se observan grandes cambios en la posición de la línea de costa y en los perfiles. Las figuras 4.7 y 4.10 muestran la influencia que tiene la oblicuidad del oleaje en la posición de la línea de costa y la geometría del perfil, respectivamente.

Tabla 4.4 Datos de entrada más relevantes para el análisis de la influencia de la dirección del oleaje.

	Dirección oleaje	Hs (m)	Tp(s)	Amplitud marea (m)
Caso 30	180	2.0	7	2.0
Caso 33	210	2.0	7	2.0
Caso 36	240	2.0	7	2.0

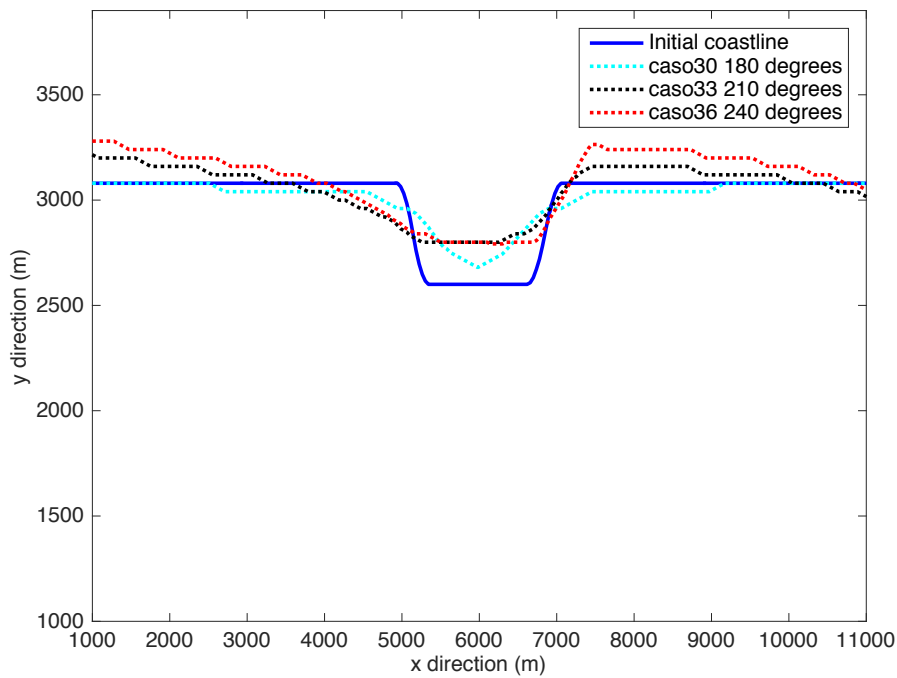


Figura 4.7 Evolución de la línea de costa después de 360 días, en los casos 30, 33 y 36.

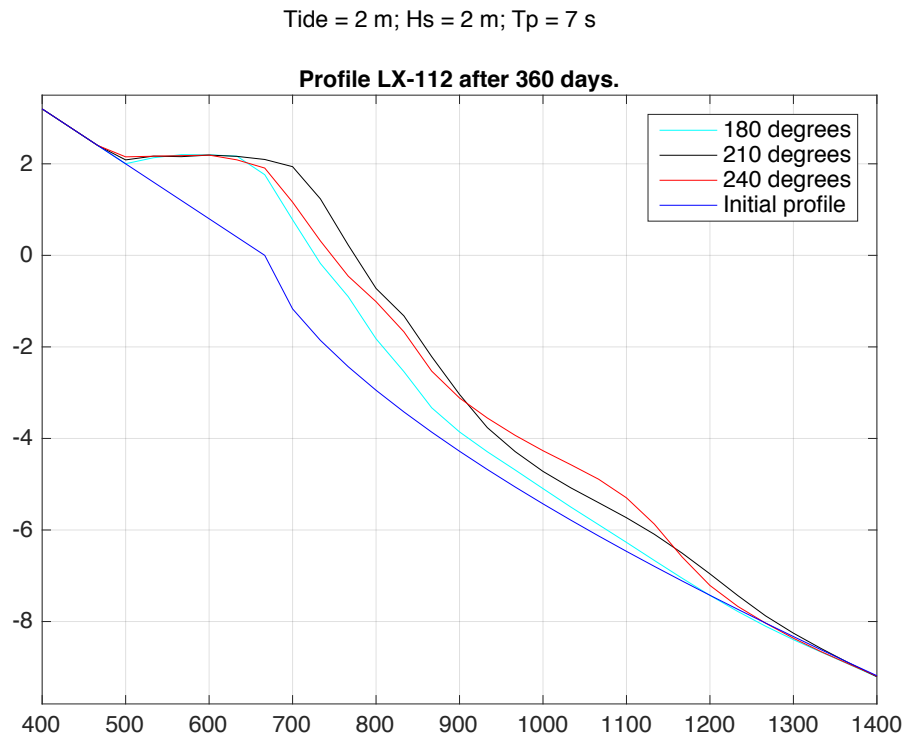


Figura 4.8 Perfil LX-112 después de 360 días para los casos 30, 33 y 36.

En el perfil LX-112 se observa un aumento del ancho de playa seca en todos los casos.

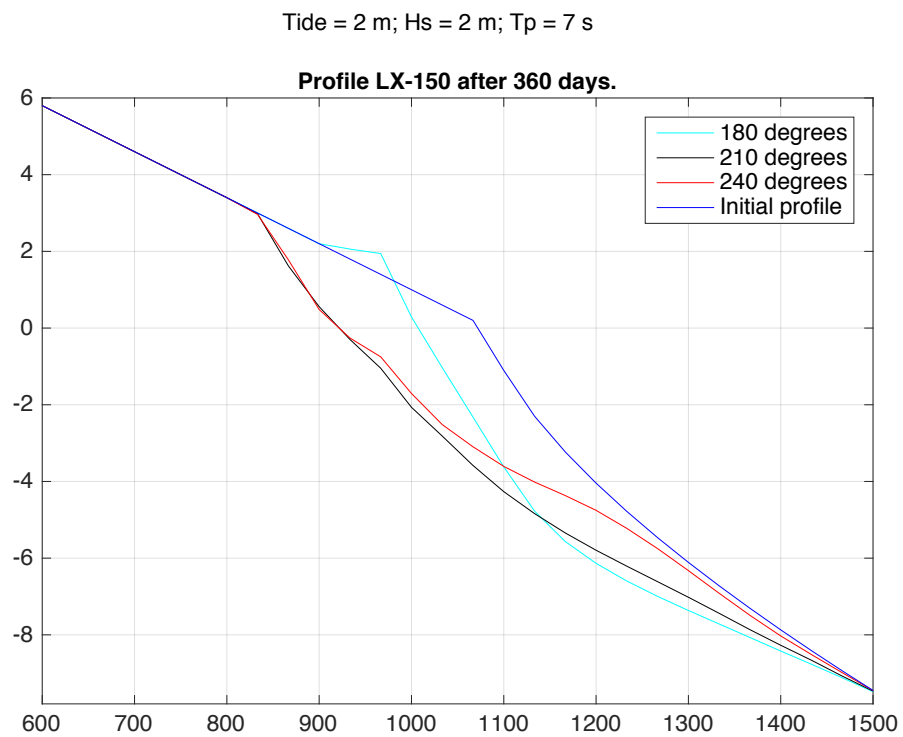


Figura 4.9 Perfil LX-150 después de 360 días para los casos 30, 33 y 36.

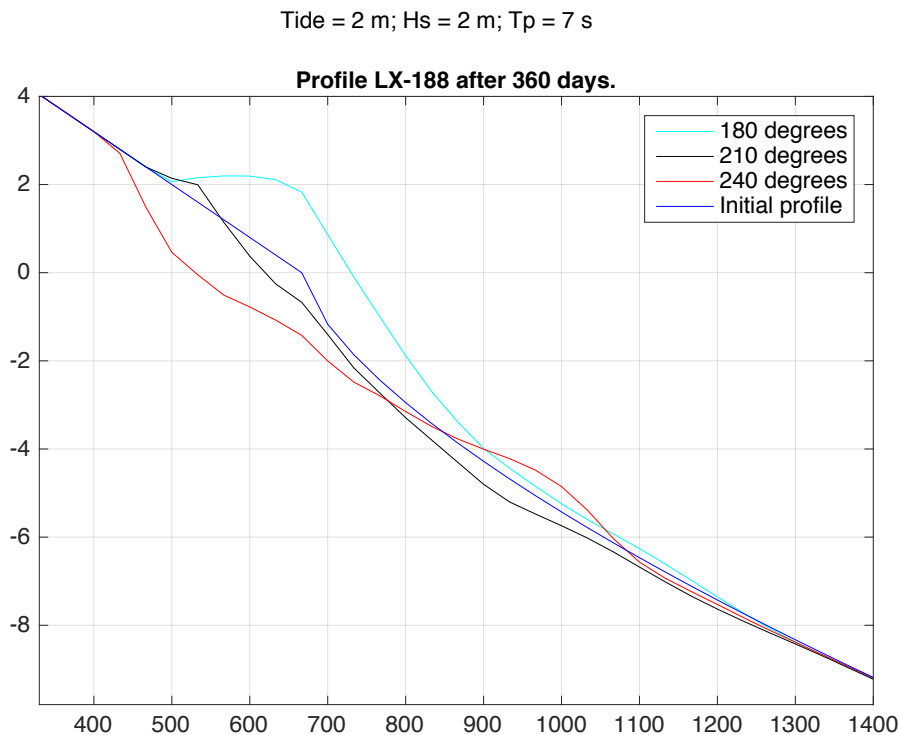


Figura 4.10 Perfil LX-188 después de 360 días para los casos 30, 33 y 36.

En el perfil LX-188 se produciría aumento del ancho de playa seca solo para el caso de oleaje 180 grados.

Conclusiones cuando la altura de ola y la amplitud de marea son de 2 m:

- El ancho medio de playa seca inicial es 788 m. En los 3 casos se produce un retroceso del ancho medio. Concretamente:
 - **Oleaje 180 grados:** ancho final 782 m
 - **Oleaje 210 grados:** ancho final 745 m
 - **Oleaje 240 grados:** ancho final 705 m
- Importante influencia de la dirección del oleaje en el ancho medio final. Mientras más oblicuo es el oleaje, más erosión presenta la playa al final de la simulación.
- A diferencia del análisis que acabamos de realizar para los casos 19, 22 y 25 (amplitud de marea y altura de ola 0.5 m), aquí observamos que cuando la altura de ola y la amplitud de marea son grandes (2 m) se consigue mayor difusión del sedimento, variando significativamente la geometría de la línea de costa.

4.1.3 Influencia del período pico.

En este apartado se analiza la evolución de la posición de la línea de costa, manteniendo carrera de marea, altura y dirección del oleaje constantes. En la Tabla 4.5 se recogen, a modo de resumen, los datos de entrada de los casos comparados:

Tabla 4.5 Datos de entrada más relevantes para el análisis de la influencia del período pico..

	Dirección oleaje	Hs (m)	Tp(s)	Amplitud marea (m)
Caso 01	180	0.5	12	0.5
Caso 19	180	0.5	7	0.5

Se muestran datos tras 360 días:

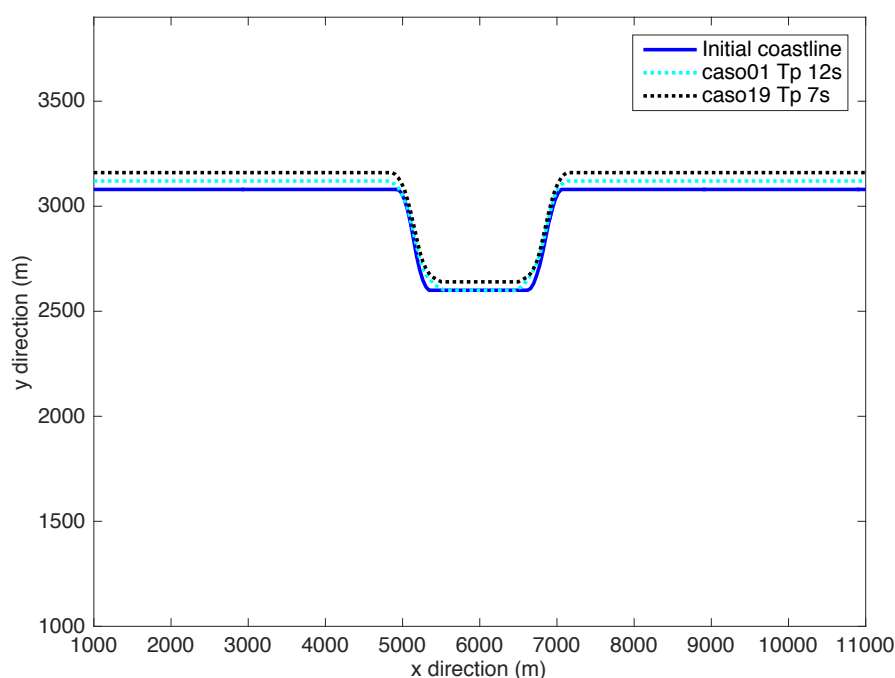


Figura 4.11 Evolución de la línea de costa después de 360 días, en los casos 01 y 19.

- El ancho medio de playa seca inicial es 788 m. En los 2 casos se produce un retroceso del ancho medio. Concretamente:
 - **Período pico 12 s:** ancho final 753 m
 - **Período pico 7 s:** ancho final 716 m
- Los oleajes de períodos más bajos demuestran ser más agresivos, reduciendo el ancho medio final de playa seca.
- La geometría final es casi idéntica independientemente del período. Puede deberse a que la altura de ola es demasiado pequeña (0.5 m)
- Con los resultados observados hasta ahora, podemos decir que la dirección del oleaje es la variable más influyen en la "forma o geometría" de la línea de costa (sin atender a la magnitud).

4.1.4 Influencia de la altura de ola.

En este apartado se analiza la evolución de la posición de la línea de costa, manteniendo carrera de marea, dirección y período del oleaje constantes. En la Tabla 4.6 se recogen, a modo de resumen, los datos de entrada de los casos comparados:

Tabla 4.6 Datos de entrada más relevantes para el análisis de la influencia de la carrera de marea..

	Dirección oleaje	Hs (m)	Tp(s)	Amplitud marea (m)
Caso 19	180	0.5	7	0.5
Caso 28	180	2.0	7	0.5

Se muestran datos tras 180 días y tras 360 días:

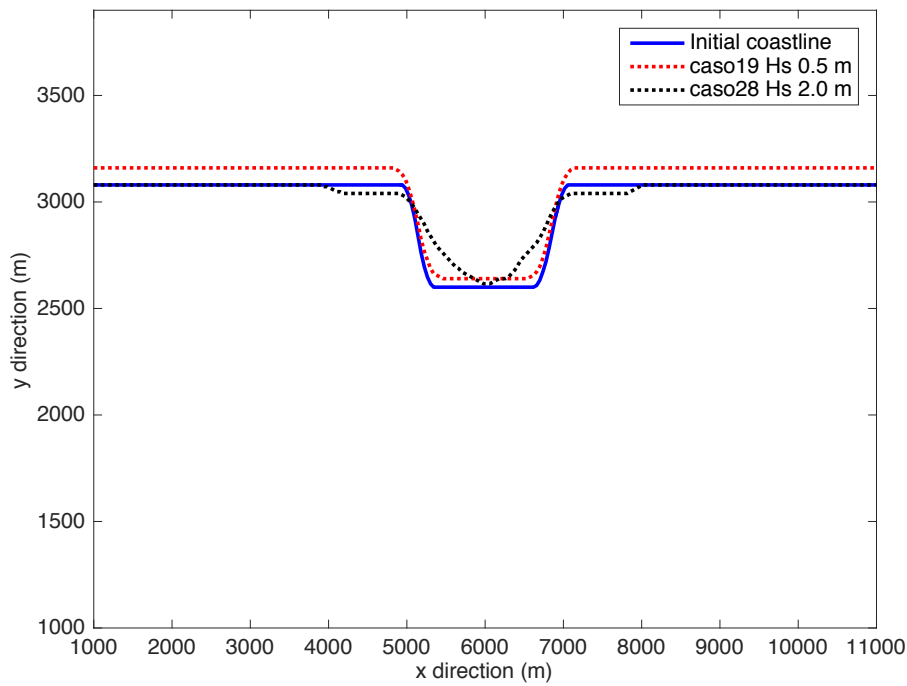


Figura 4.12 Evolución de la línea de costa después de 180 días, en los casos 19 y 28.

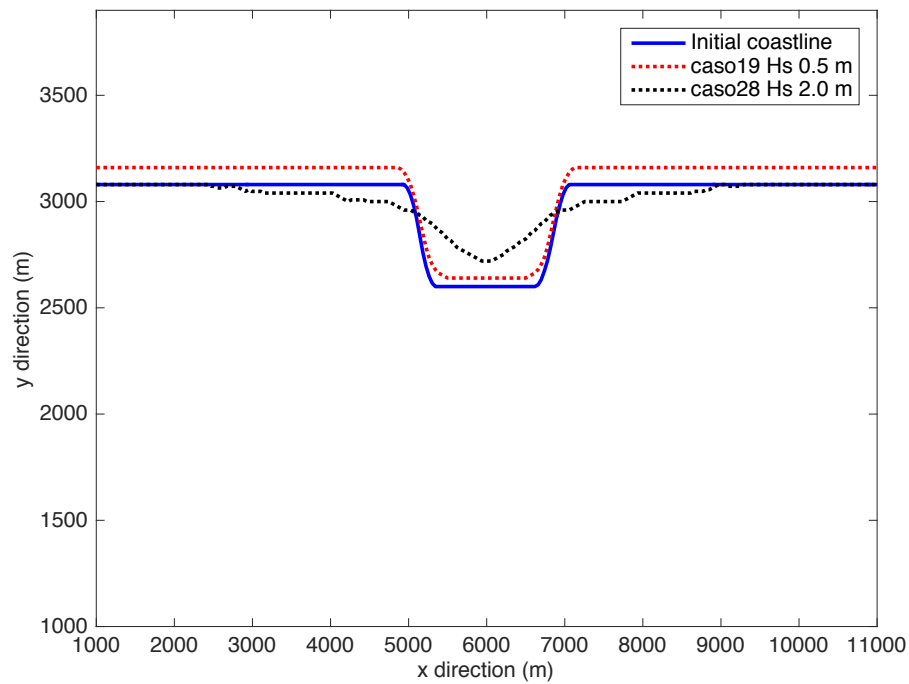


Figura 4.13 Evolución de la línea de costa después de 360 días, en los casos 19 y 28.

- El ancho medio de playa seca inicial es 788 m. En los 2 casos se produce un retroceso del ancho medio. Concretamente:
 - **Altura de ola significativa 0.5 m:** ancho final 714 m
 - **Altura de ola significativa 2.0 m:** ancho final 781 m
- Los oleajes de mayor altura (2.0 m) demuestran difundir el sedimento de forma más eficiente, obteniéndose menor ancho en el centro de la regeneración pero mayor ancho medio de playa seca en el dominio completo, respecto al caso con altura de ola pequeña (0.5 m)
- La altura de ola también influye en la "forma o geometría" de la línea de costa (sin atender a la magnitud).

A modo de resumen se puede concluir que mientras mayor es la altura de ola, mayor capacidad tiene para difundir el sedimento, permitiendo ganar más playa seca en las colas de la regeneración y provocando que el ancho medio de playa seca sea mayor.

4.2 Análisis multivariable

Para obtener información sobre la evolución de la línea de costa y analizar qué variables influyen más en la vida útil de la regeneración, la metodología de análisis consta de tres componentes:

1. Cálculo de posiciones de línea de costa y volúmenes a lo largo del tiempo.
2. Análisis de las tendencias de la playa durante el período de observación en función de las variables independientes (altura de ola, período de oleaje, amplitud de marea, direccionalidad del oleaje).
3. Una investigación y clasificación de los movimientos de los perfiles transversales.

El primero tiene como objetivo cuantificar el movimiento de la línea costera a lo largo del tiempo y los cambios relacionados en el volumen de material de playa en el perfil medido para descubrir tendencias a largo plazo en la disponibilidad general de sedimentos. Los volúmenes de playa (volumen por unidad de distancia a lo largo de la línea de costa) se calcularon a partir de la profundidad de 0 m del nivel del agua. El método utilizado para calcular los volúmenes fue la función de integración numérica trapezoidal disponible en MATLAB.

El segundo componente tiene como objetivo analizar si existe alguna relación entre las diferentes variables determinan la evolución de la línea de costa. Este último se discute con más detalle a continuación.

El componente final clasifica 3 secciones transversales a la línea de costa (LX-112, LX-150, LX-188) para cada uno de los 36 casos simulados, de acuerdo al "Foreshore Change Classification System".

4.2.1 Análisis 1

Analizamos como varía el ancho de playa seca para diferentes valores de carrera de marea y dirección. En todos los casos el período de oleaje es constante (7 s) y la altura de ola es pequeña (0.5 m)

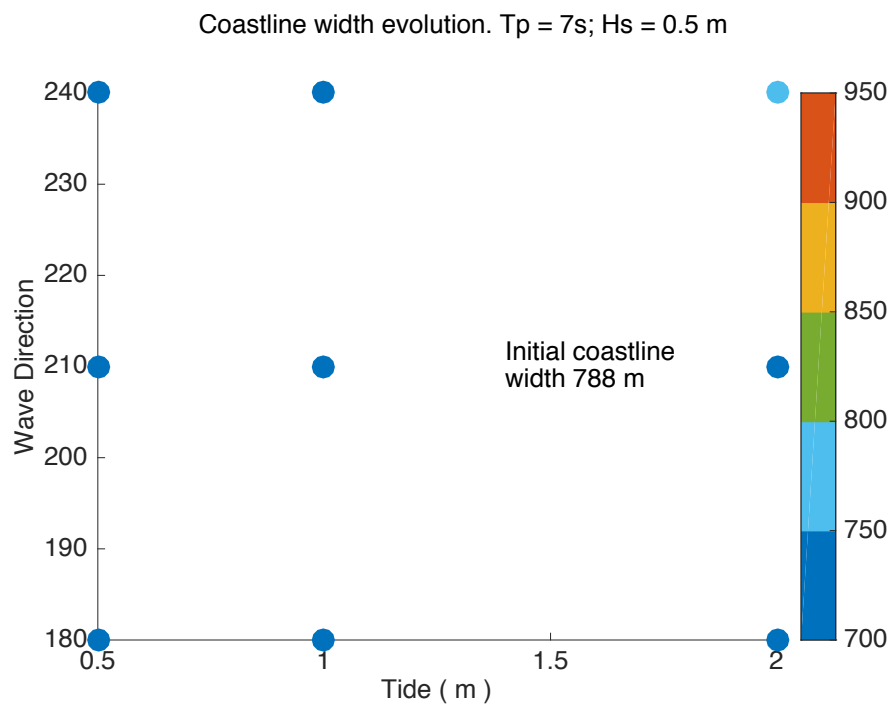


Figura 4.14 Ancho medio de playa seca al final de la simulación (360 días) para diferentes valores de amplitud de marea y dirección del oleaje.

Conclusiones:

- El mayor ancho de playa seca se obtiene, al contrario de lo que podríamos intuir, para sistema macro mareales y oleaje oblicuo (240°).
- En general, se produce un retroceso del ancho medio de playa seca.

4.2.2 Análisis 2

Analizamos cómo varía el ancho de playa seca para diferentes valores de carrera de marea y dirección. En todos los casos el período de oleaje es constante (7 s) y la altura de ola es grande (2 m)

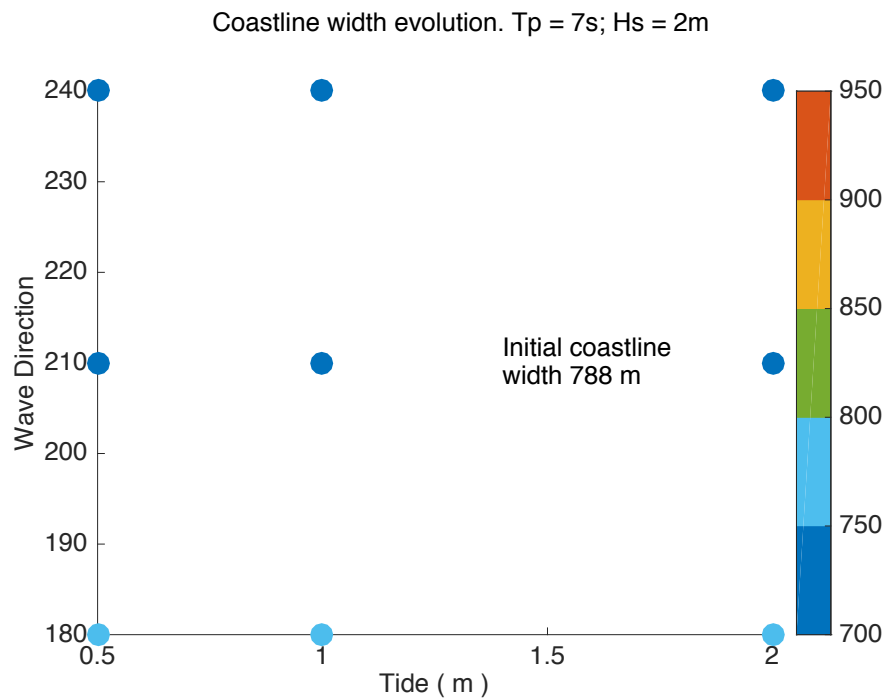


Figura 4.15 Ancho medio de playa seca al final de la simulación (360 días) para diferentes valores de amplitud de marea y dirección del oleaje.

Conclusiones:

- Se observan patrones claros.
- En caso de altura de ola grande (2m), se concluye que los oleajes normales a la línea de costa (180 grados) son los que conducen a los mayores anchos de playa seca.
- Mientras más oblicuo sea el oleaje, menor será el ancho de playa seca.

4.2.3 Análisis 3

En este apartado comparamos si los análisis multivariable realizados en las secciones Análisis 1 y Análisis 2 presentan alguna diferencia cuando el período del oleaje pasa a ser de 12 s en lugar de 7s.

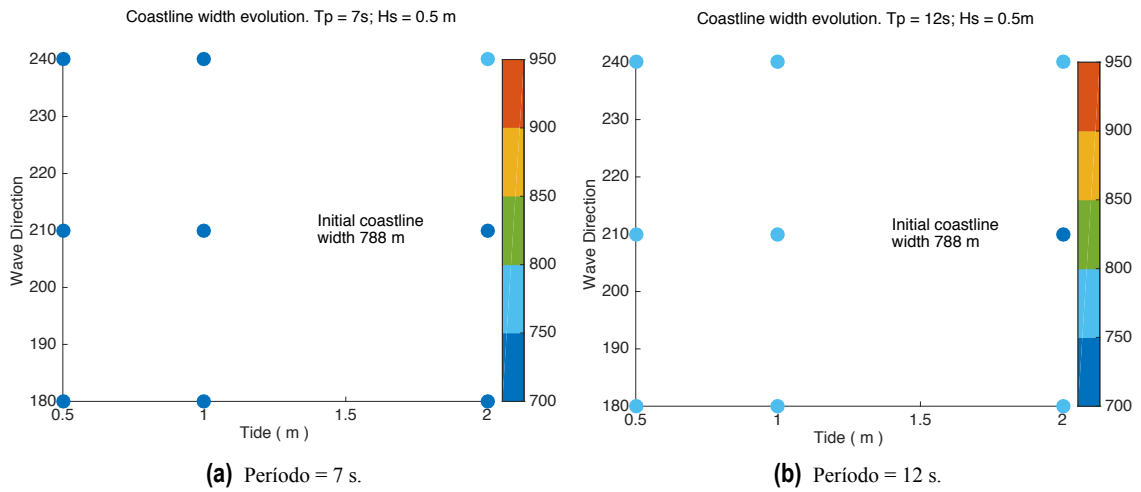


Figura 4.16 Análisis multivariable para obtener el ancho medio de playa seca, considerando una altura de ola de 0.5 m y períodos de oleaje de 7 y 12 segundos. (a) representa los casos: 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26 y 27. (b) representa los casos: 01, 02, 03, 04, 05, 06, 07, 08 y 09.

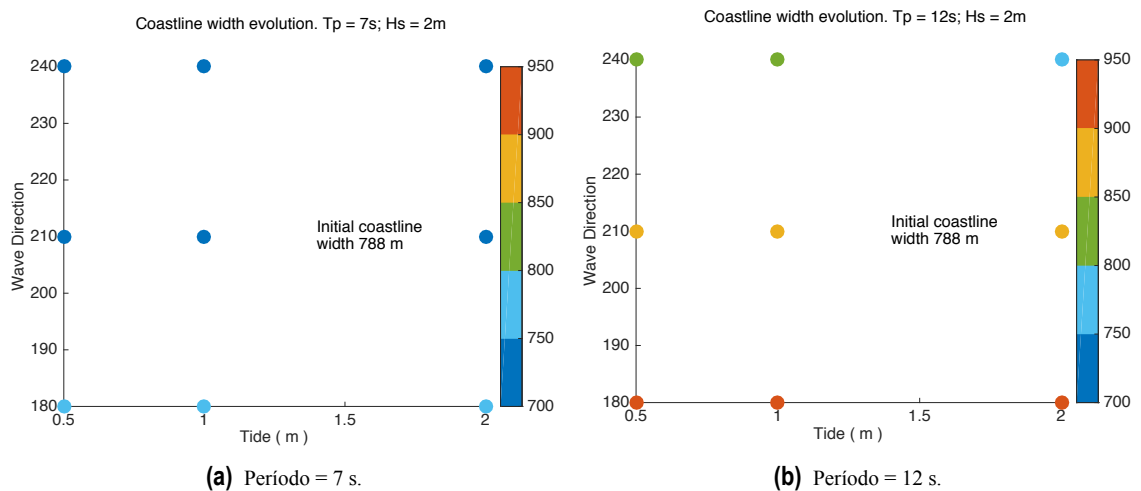


Figura 4.17 Análisis multivariable para obtener el ancho medio de playa seca, considerando una altura de ola de 2 m y períodos de oleaje de 7 y 12 segundos. (a) representa los casos: 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35 y 36. (b) representa los casos: 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17 y 18.

Comparando las figuras 4.16a, 4.16b, 4.17a y 4.17b, se concluye que los casos representados en la figura 4.17b son los que conducen a mayores anchos medios de playa seca al final del periodo de simulación. Estos casos tienen en común que emplean un período de oleaje de 12 s y una altura de ola significativa de 2m. Concretamente nos referimos a los casos: 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17 y 18. Asimismo, en la figura 4.17b se observan que conforme aumenta la oblicuidad del oleaje, disminuye el ancho medio de playa seca final, para las condiciones de período de oleaje 12 s y altura de ola 2 m. Sin embargo, para el resto de períodos y alturas de ola analizados, la direccionalidad del oleaje no parece ser un factor que tenga una influencia significativa. Únicamente en la figura 4.16a, podríamos señalar que los oleajes simétricos (180°) conducen a un ancho medio de playa seca mayor.

Por otro lado, comparando las figuras 4.16a y 4.16b, se observa que, en presencia de altura de ola pequeña (0.5 m), los oleajes de período largo (12 s) conducen a anchos medios de playa seca ligeramente mayores que en los casos de período corto (7 s).

Estas conclusiones se ven ratificadas si analizamos, para cada una de las 36 simulaciones, el volumen de playa seca ganado o perdido a lo largo de toda la longitud de la playa al final del período de simulación. En la Figura 4.18 se observa que en los casos 10 al 18, son en los que se producen mayores ganancias de playa seca.

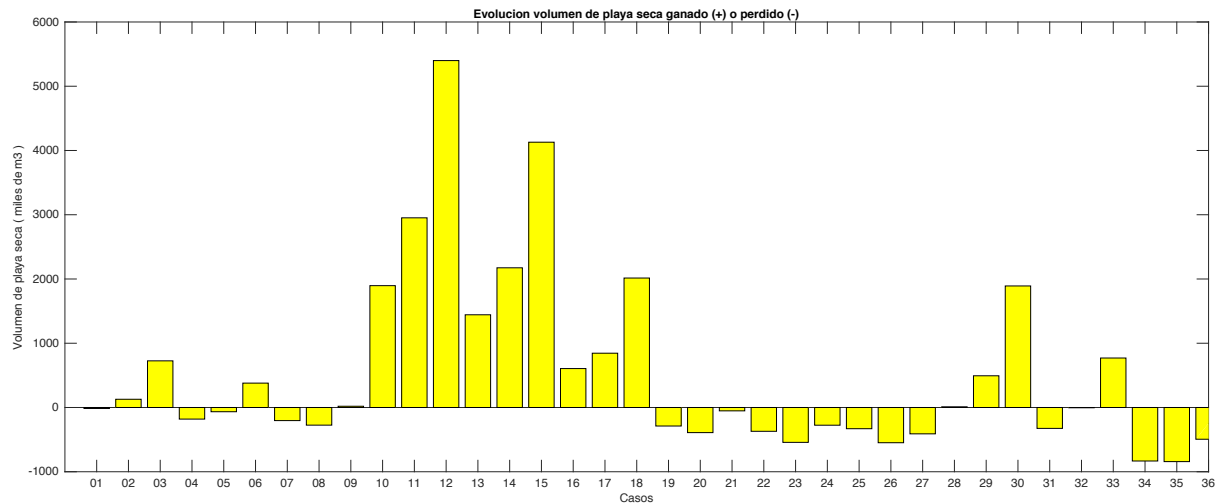


Figura 4.18 Volumen de playa seca ganado (+) o perdido (-) en miles de m^3 a lo largo de toda la longitud de la playa (dominio nest) al final de la simulación, para cada uno de los 36 casos analizados.

4.2.3.1 Caso 12

De todas las simulaciones realizadas, el caso 12 es el que arroja los resultados más favorables respecto a ganancia de playa seca, que al fin y al cabo es el objetivo fundamental en las regeneraciones. Por tanto, a continuación se van a analizar con detalle la evolución temporal de la línea de costa y del perfil transversal LX-150 para la simulación 12.

Comencemos observando la evolución que sufre la línea de costa:

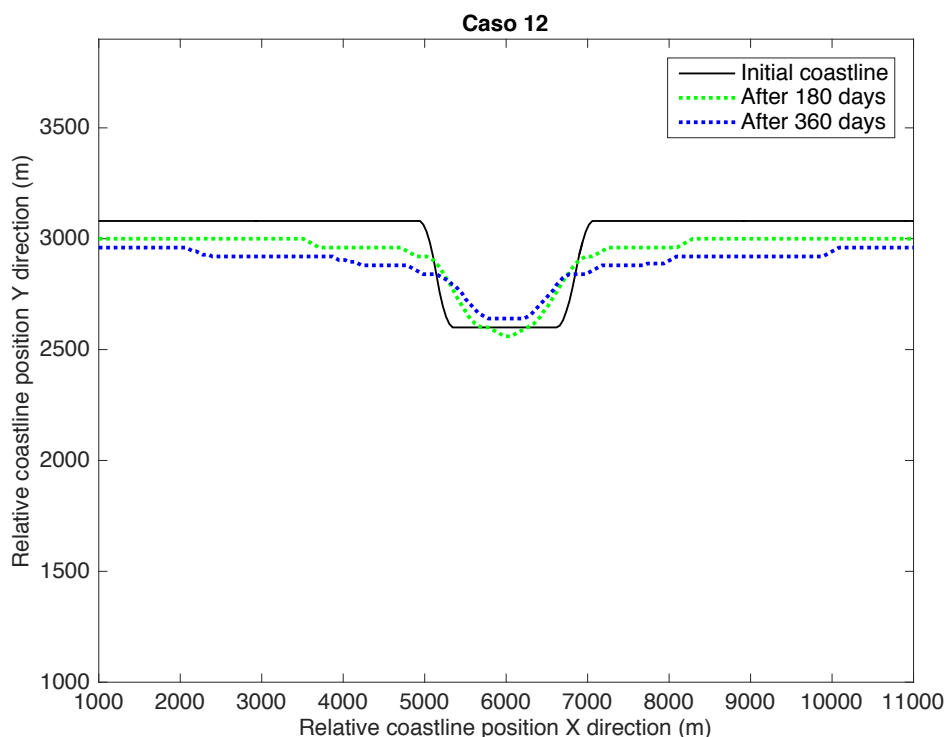


Figura 4.19 Evolución de la posición de la línea de costa para la simulación 12, después de 180 días (verde) y 360 días (azul).

En la Figura 4.19 se aprecia que las condiciones hidrodinámicas tienden a generar un claro aumento del ancho medio de playa seca en las proximidades a la regeneración. Dado que el oleaje es simétrico, la solución obtenida, también lo es. A continuación se recoge en la Tabla 4.7 los valores numéricos del ancho medio de playa seca para varios instantes de tiempo:

Tabla 4.7 Simulación 12. Ancho medio de playa seca para varios instantes de tiempo.

Caso 12	Día 0	Día 180	Día 360
Ancho medio de playa seca	788 m	857 m	903 m

Por otro lado, representemos la evolución que sufre el perfil LX-150:

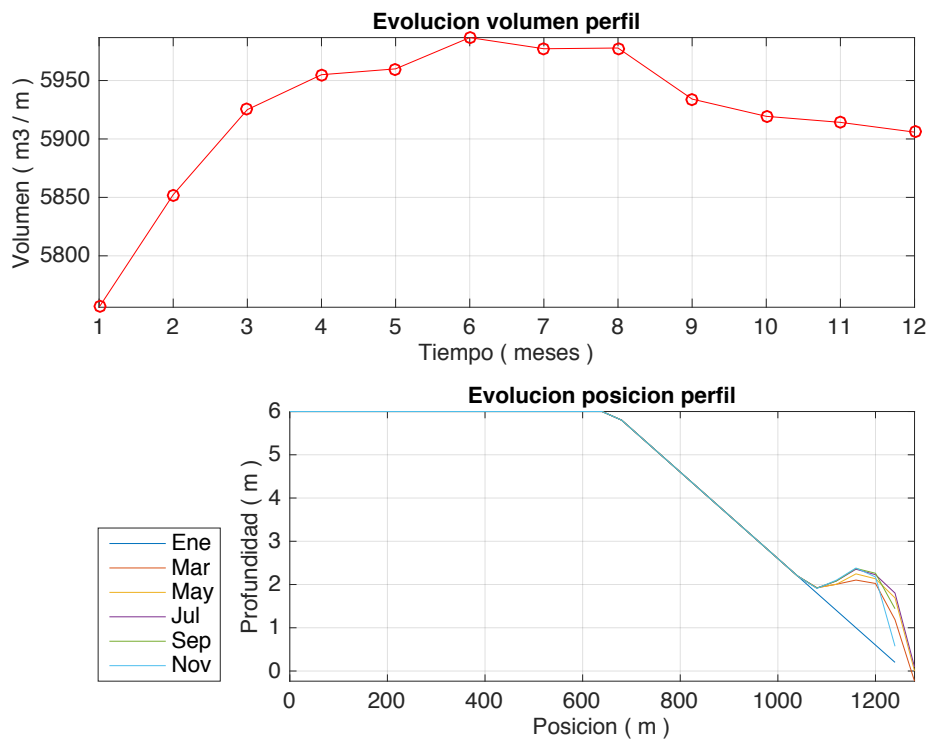


Figura 4.20 Evolución de la posición y el volumen seco del perfil LX150 para el caso12 en función del tiempo.

En la Figura 4.20 se observa que durante los 3 primeros meses es cuando se gana con mayor volumen de playa seca con mayor rapidez. Posteriormente, tras el mes 4, el volumen del perfil se mantiene prácticamente constante, presentando sólo pequeñas fluctuaciones. En este caso se ha decidido representar el perfil LX-150, que es el correspondiente a la zona central de la regeneración. No obstante se han analizado también los perfiles LX-112 y LX-188, obteniéndose similares conclusiones.

No obstante, si nos referimos a volumen seco del área total de estudio, la ganancia de playa seca es progresiva durante toda la simulación, como se puede observar en la Figura 4.21, aunque también es más pronunciada durante los 3 primeros meses.

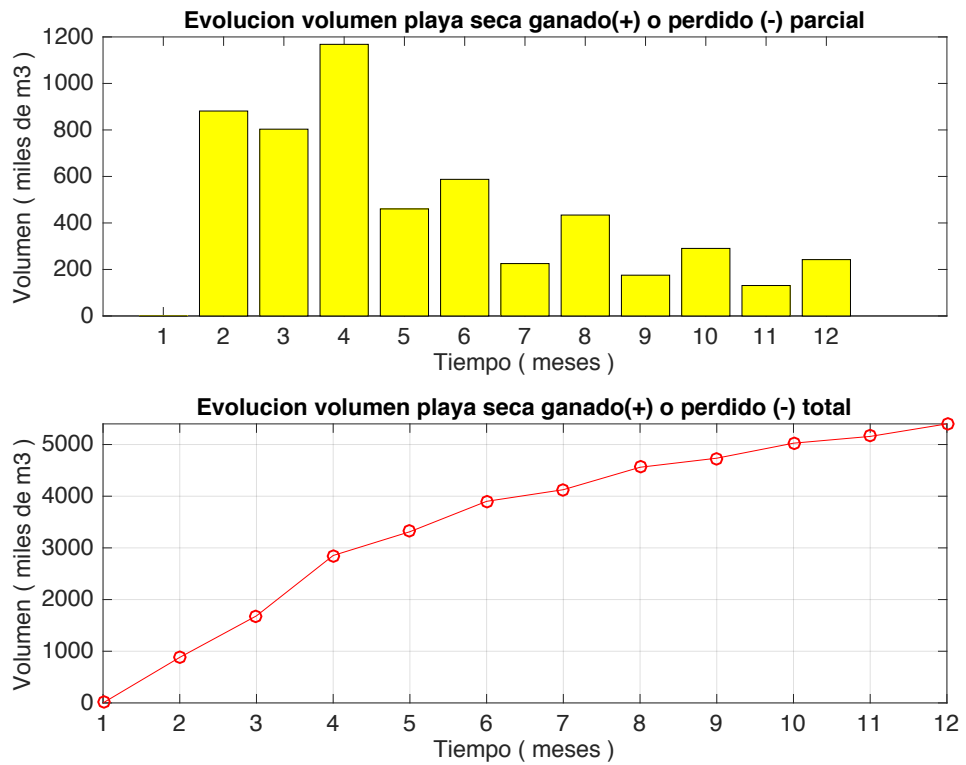


Figura 4.21 Evolución de la posición y el volumen seco del perfil LX150 para el caso12 en función del tiempo.

4.2.3.2 Caso 20

Los resultados del caso 20, en el que también se somete el modelo a un oleaje simétrico (180°), contrastan significativamente con lo obtenido en el caso 12, siendo las únicas diferencias entre ambos modelos: la altura de ola, el período del oleaje y la amplitud marea.

Tabla 4.8 Datos de entrada más relevantes para el análisis del caso 20.

	Dirección oleaje	Hs (m)	Tp(s)	Amplitud marea (m)
Caso 20	180	0.5	7	1

A pesar de estar ante un caso simétrico, como ocurría en el caso 12, ahora los resultados de ancho medio de playa seca, al contrario de lo que podría intuirse, son sustancialmente menores, como puede observarse en la Figura 4.22 y en la Tabla 4.9. El motivo es que cuando la marea y la altura de ola son pequeñas, apenas tienen capacidad para difundir el sedimento hacia otras zonas, perdiéndose playa seca.

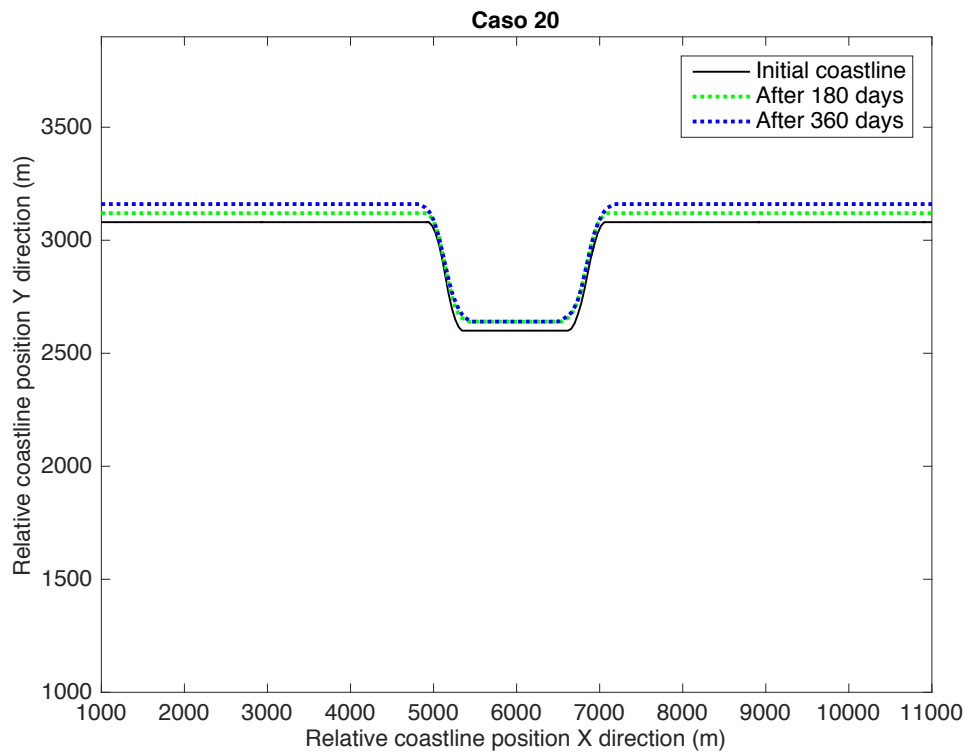


Figura 4.22 Evolución de la posición de la línea de costa para la simulación 20, después de 180 días (verde) y 360 días (azul).

Tabla 4.9 Simulación 20. Ancho medio de playa seca para varios instantes de tiempo.

Caso 20	Día 0	Día 180	Día 360
Ancho medio de playa seca	788 m	747 m	716 m

Asimismo, también se aprecia una reducción del volumen seco del perfil central de la regeneración (LX-150). Se han analizado también los perfiles LX-112 y LX-188, obteniéndose similares conclusiones.

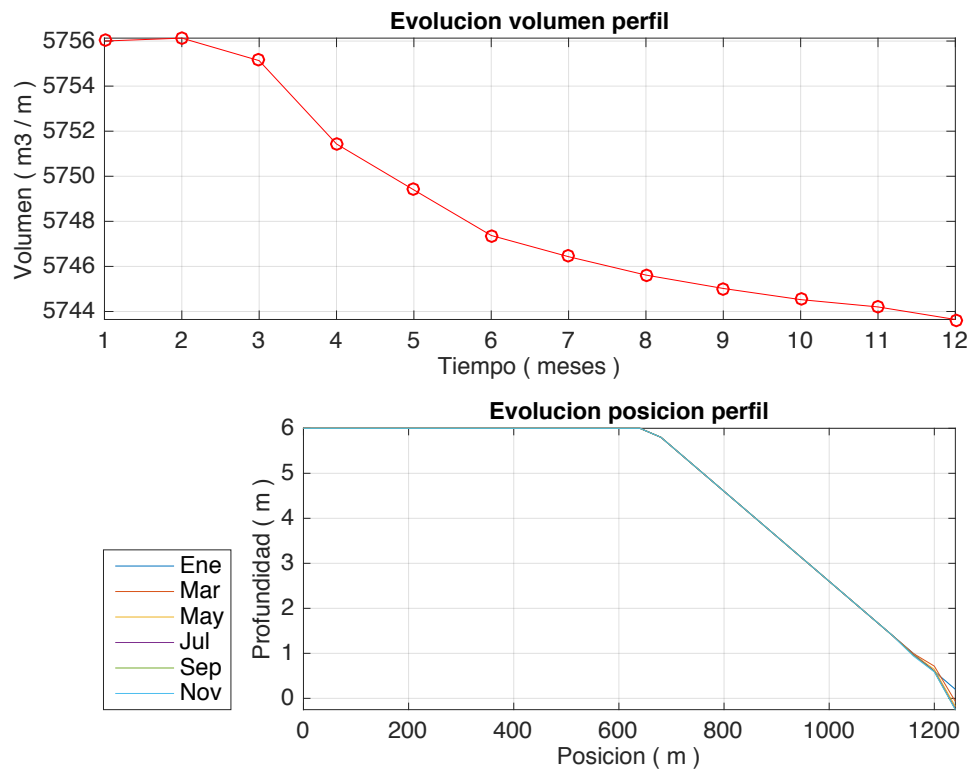


Figura 4.23 Evolución de la posición y el volumen seco del perfil LX150 para el caso20 en función del tiempo.

De igual modo, si nos referimos a volumen seco del área total de estudio, la pérdida de playa seca es progresiva durante toda la simulación, como se puede observar en la Figura 4.24, aunque también es más pronunciada durante los 3 primeros meses.

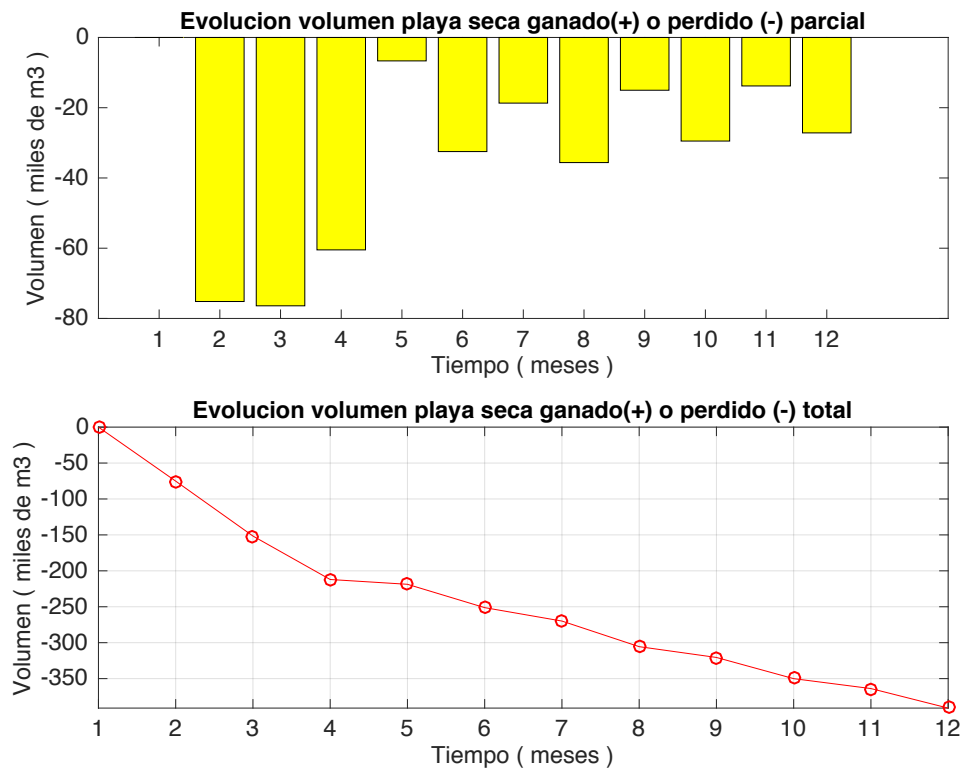


Figura 4.24 Evolución de la posición y el volumen seco del perfil LX150 para el caso 20 en función del tiempo.

4.3 Clasificación de perfiles transversales

En este trabajo de fin de máster se ha usado la clasificación sugerida por Townend and McLaren (1988) para evaluar los cambios en el perfil a lo largo del tiempo. De acuerdo con [Reeve et al., 2019], se denomina "Foreshore Change Classification System" y en ella los cambios en la pendiente de playa entre el MHWS (High Water) y el MLWS (Low Water) se clasifican en 13 posibles categorías. El "Foreshore Change Parameter" (FCP) toma valores positivos / negativos si el perfil de la playa se mueve hacia el mar / tierra respectivamente. Los valores numéricos se asignan de acuerdo con el tipo de cambio en la pendiente de la playa. El valor numérico del FCP no proporciona ninguna indicación cuantitativa del cambio de playa, simplemente su sentido (signo) y tipo (valor).

Las Figura 4.25 muestra el esquema de clasificación en función del FCP. Los colores que van desde el lila hasta cyan representan los perfiles en avance, los colores verdes no representan movimiento y los colores que van desde el amarillo hasta el rojo representan los perfiles en retroceso.

FCP	MHWS	MLWS	Inter-tidal (gradient)	Profile change
+6	Advance	Advance	Flattening	
+5	Advance	Advance	No rotation	
+4	Advance	Advance	Steepening	
+3	Advance	No movement	Steepening	
+2	Advance	Retreat	Steepening	
+1	No movement	Advance	Flattening	
0	No movement	No movement	No rotation	
-1	No movement	Retreat	Steepening	
-2	Retreat	Advance	Flattening	
-3	Retreat	No movement	Flattening	
-4	Retreat	Retreat	Flattening	
-5	Retreat	Retreat	No rotation	
-6	Retreat	Retreat	Steepening	

Figura 4.25 Foreshore change classification system. Los cambios esquemáticos del perfil se muestran en rojo. Las zonas que se encuentra por debajo del Low Water o por encima del High Water se muestran planas ya que no tienen ninguna relevancia en la clasificación. Fuente: [Reeve et al., 2019].

El sentido y el tipo de movimiento se determinan a partir de los cambios en la posición de la línea MHWS y MLWS. Esto se ilustra en la Figura 4.26 que muestra cómo se determina el FCP.

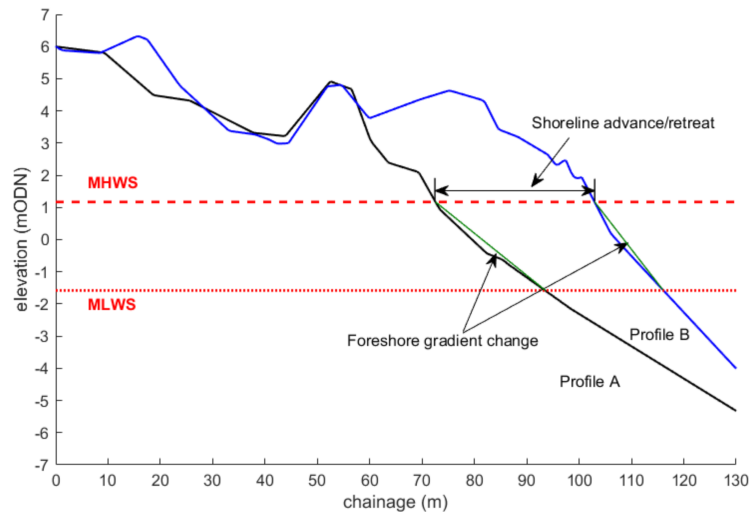


Figura 4.26 Boceto de un perfil de playa en el que se muestra el avance / retroceso de los perfiles A y B.
Fuente: [Reeve et al., 2019].

Teniendo en cuenta el sistema que acabamos de describir, la clasificación de los perfiles LX-112, LX-150 y LX-188 para cada una de las 36 simulaciones realizadas, se recoge en la Tabla 4.10. Para elaborarla se han realizado unas gráficas para cada una de las simulaciones, como se muestra a modo de ejemplo en la Figura 4.27.

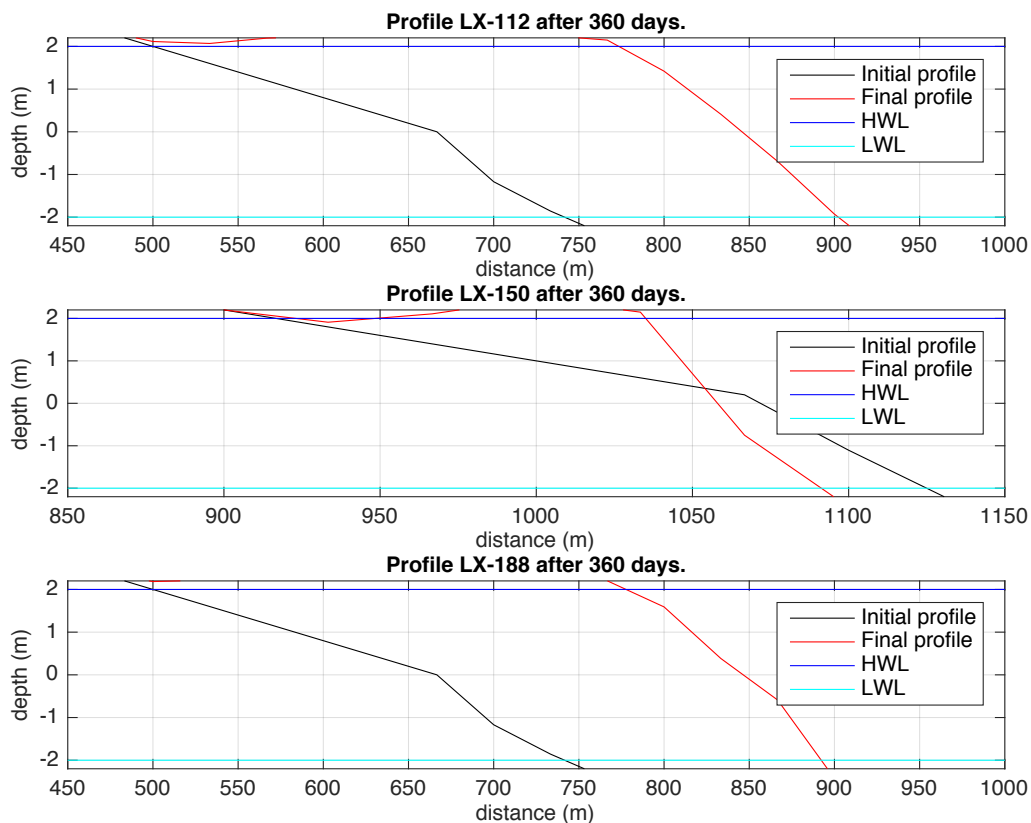


Figura 4.27 Caso 12. Perfiles LX-112, LX-150, LX-188. Se muestra el perfil inicial y final después de 360 días de simulación entre el "High Water Level" y el "Low Water Level".

Tabla 4.10 Clasificación perfiles de acuerdo al "Foreshore Change Classification System".

Caso	LX-112	LX-150	LX-188	Oleaje	Amp. Marea	Hs	T
01	+6	+1	+6	180	0.5	0.5	12
02	+5	+4	+5	180	1	0.5	12
03	0	+3	0	180	2	0.5	12
04	+1	-2	-4	210	0.5	0.5	12
05	+6	+1	+2	210	1	0.5	12
06	+1	+5	0	210	2	0.5	12
07	-4	-2	-6	240	0.5	0.5	12
08	-2	-2	-4	240	1	0.5	12
09	+1	+3	0	240	2	0.5	12
10	+4	+4	+4	180	0.5	2	12
11	+4	+2	+4	180	1	2	12
12	+4	+2	+4	180	2	2	12
13	+4	-6	+4	210	0.5	2	12
14	+4	+2	+4	210	1	2	12
15	+4	+2	+4	210	2	2	12
16	+5	-6	+5	240	0.5	2	12
17	+4	-6	+1	240	1	2	12
18	+4	-6	+4	240	2	2	12
19	-6	-4	-6	180	0.5	0.5	7
20	-4	-5	-4	180	1	0.5	7
21	+1	+3	+1	180	2	0.5	7
22	-6	-4	-6	210	0.5	0.5	7
23	-3	-5	-5	210	1	0.5	7
24	-2	+3	-3	210	2	0.5	7
25	-6	-4	-6	240	0.5	0.5	7
26	-2	-2	-4	240	1	0.5	7
27	-2	+5	-2	240	2	0.5	7
28	+4	-6	+4	180	0.5	2	7
29	+4	-6	+4	180	1	2	7
30	+4	+2	+4	180	2	2	7
31	+5	-6	-6	210	0.5	2	7
32	+4	-6	-6	210	1	2	7
33	+4	-6	+2	210	2	2	7
34	+5	-6	+6	240	0.5	2	7
35	+4	-6	-4	240	1	2	7
36	+4	-6	-4	240	2	2	7

4.3.1 Análisis Avance/Retroceso

La Tabla 4.10 contiene una información detallada y precisa sobre la geometría del perfil alcanzada en cada una de las simulaciones. Sin embargo, si obviamos ciertos detalles relativos a la inclinación del perfil y nos centramos en establecer una clasificación distinguiendo únicamente entre aquellos perfiles que avanzan hacia el mar y aquellos que retroceden hacia tierra, podríamos obtener un mapa de colores mucho más sencillo, aunque también con menos información.

Caso	LX-112	LX-150	LX-188	Oleaje	Amp. Marea	Hs	T
01	6	1	6	180	0.5	0.5	12
02	5	4	5	180	1	0.5	12
03	0	3	0	180	2	0.5	12
04	1	-2	-4	210	0.5	0.5	12
05	6	1	2	210	1	0.5	12
06	1	5	0	210	2	0.5	12
07	-4	-2	-6	240	0.5	0.5	12
08	-2	-2	-4	240	1	0.5	12
09	1	3	0	240	2	0.5	12
10	4	4	4	180	0.5	2	12
11	4	2	4	180	1	2	12
12	4	2	4	180	2	2	12
13	4	-6	4	210	0.5	2	12
14	4	2	4	210	1	2	12
15	4	2	4	210	2	2	12
16	5	-6	5	240	0.5	2	12
17	4	-6	1	240	1	2	12
18	4	-6	4	240	2	2	12
19	-6	-4	-6	180	0.5	0.5	7
20	-4	-5	-4	180	1	0.5	7
21	1	3	1	180	2	0.5	7
22	-6	-4	-6	210	0.5	0.5	7
23	-3	-5	-5	210	1	0.5	7
24	-2	3	-3	210	2	0.5	7
25	-6	-4	-6	240	0.5	0.5	7
26	-2	-2	-4	240	1	0.5	7
27	-2	5	-2	240	2	0.5	7
28	4	-6	4	180	0.5	2	7
29	4	-6	4	180	1	2	7
30	4	2	4	180	2	2	7
31	5	-6	-6	210	0.5	2	7
32	4	-6	-6	210	1	2	7
33	4	-6	2	210	2	2	7
34	5	-6	6	240	0.5	2	7
35	4	-6	-4	240	1	2	7
36	4	-6	-4	240	2	2	7

Figura 4.28 Clasificación de perfiles de acuerdo al "Foreshore Change Classification System", mostrando en color verde los valores del FCP mayores o iguales que cero (avance o no movimiento) y en rojo los valores negativos (retroceso).

Esta última clasificación nos permite establecer las siguientes conclusiones respecto al avance/retroceso de los perfiles analizados:

Considerando el período del oleaje:

- De todos los casos estudiados con oleaje de período 12s, el 78% muestran avance o no movimiento.
- De todos los casos estudiados con oleaje de período 7s, el 37% muestran avance o no movimiento.

Podemos concluir, por tanto, que los oleajes de períodos más cortos son, en general, más agresivos. Esta situación puede ilustrarse verificando en la Tabla 4.10 la clasificación de los perfiles para los casos 01 y 19.

Considerando la dirección del oleaje:

- De todos los casos estudiados con oleaje de 180°, el 78% muestran avance o no movimiento.
- De todos los casos estudiados con oleaje de 210°, el 56% muestran avance o no movimiento.
- De todos los casos estudiados con oleaje de 240°, el 37% muestran avance o no movimiento.

Se observa una clara tendencia, oleajes más oblicuos son más propensos a provocar un retroceso de los perfiles. Esta situación puede ilustrarse verificando en la Tabla 4.10 la clasificación de los perfiles para los casos 01, 04 y 07.

Considerando la altura de ola:

- De todos los casos estudiados con oleaje de $H_s = 0.5\text{m}$, el 44 % muestran avance o no movimiento.
- De todos los casos estudiados con oleaje de $H_s = 2.0\text{m}$, el 70 % muestran avance o no movimiento.

Como ya se comentó en la sección 4.1.4, los oleajes de mayor altura facilitan la difusión del sedimento, obteniéndose mayores anchos medios de playa seca. Esta situación puede ilustrarse verificando en la Tabla 4.10 la clasificación de los perfiles para los casos 20 y 29.

Considerando la amplitud de marea:

- De todos los casos estudiados con amplitud de marea 0.5m , el 44 % muestran avance o no movimiento.
- De todos los casos estudiados con amplitud de marea 1.0m , el 50 % muestran avance o no movimiento.
- De todos los casos estudiados con amplitud de marea 2.0m , el 78 % muestran avance o no movimiento.

La conclusión es similar a la que obteníamos con la altura de ola. Mayores amplitudes de marea favorecen la difusión del sedimento y la ganancia de ancho medio de playa seca. Esta situación puede ilustrarse verificando en la Tabla 4.10 la clasificación de los perfiles para los casos 19 y 21.

Finalmente se recogen en la Tabla 4.11 los anchos medios de playa seca al final del período de simulación, para todos los casos analizados.

Tabla 4.11 Ancho medio de playa seca al final del período de simulación (360 días) para las 36 simulaciones realizadas..

Caso	Ancho medio (m)	Diferencia (m)
Inicial	788	0
Caso 01	756	-32
Caso 02	755	-33
Caso 03	750	-38
Caso 04	755	-33
Caso 05	754	-34
Caso 06	750	-38
Caso 07	755	-33
Caso 08	751	-37
Caso 09	751	-37
Caso 10	938	150
Caso 11	924	136
Caso 12	904	116
Caso 13	884	96
Caso 14	869	81
Caso 15	860	72
Caso 16	814	26
Caso 17	805	17
Caso 18	787	-1
Caso 19	715	-73
Caso 20	717	-71
Caso 21	749	-39
Caso 22	715	-73
Caso 23	718	-70
Caso 24	748	-40
Caso 25	717	-71
Caso 26	719	-69
Caso 27	751	-37
Caso 28	782	-6
Caso 29	780	-8
Caso 30	782	-6
Caso 31	750	-38
Caso 32	749	-39
Caso 33	745	-43
Caso 34	710	-78
Caso 35	707	-81
Caso 36	705	-83

5 Conclusiones

Este trabajo de fin de máster tenía como objetivo principal, analizar la influencia que tiene el clima marítimo en la evolución y durabilidad de una regeneración de playa con sedimento de aportación. Para ello se han llevado a cabo un total de 36 simulaciones empleando el software Delft3D. Cada una de estas simulaciones diferían en los valores de las variables: altura de ola, periodo pico del oleaje, dirección del oleaje y amplitud de marea. Es importante considerar que las conclusiones que se extraen de este trabajo son válidas para el modelo definido. Cualquier modificación de otras variables de entrada (p.e. forma de la regeneración, tamaño de sedimento, perfil inicial, dimensiones) podría conducir a unos resultados y conclusiones diferentes. A continuación destacamos las conclusiones más significativas que se han alcanzado con este trabajo.

- Respecto a la influencia de la altura de ola podemos concluir que: alturas de ola grandes producen mayores anchos medios de playa seca al final del periodo de simulación. Además alteran significativamente la geometría de la línea de costa. Sin embargo cuando la altura de ola es baja, el retroceso de playa que se produce es mayor y prácticamente paralelo a la posición original. Es decir, con alturas de ola bajas el problema es muy poco difusivo y en lugar de difundirse el sedimento a lo largo de la playa, simplemente se produce un ajuste con el perfil de equilibrio, perdiéndose playa seca pero no variando la geometría.
- En cuanto a la influencia de la direccionalidad del oleaje podemos decir que cuando la altura de ola es pequeña y la amplitud de marea es pequeña, como ocurre en los casos 19, 22 y 25; la dirección del oleaje apenas tiene influencia en el ancho medio final de playa seca. Obteniéndose prácticamente la misma solución en las 3 simulaciones. Sin embargo, cuando la amplitud de marea es elevada y la altura de ola también lo es, como ocurre en los casos 30, 33 y 36, la dirección del oleaje juega un papel determinante en la morfología de la costa. Concretamente, cuando la altura de ola es baja, la geometría final es casi idéntica independientemente de la dirección. Sin embargo cuando la altura de ola es mayor, la direccionalidad del oleaje influye significativamente en la evolución de la geometría de la línea de costa
- Analizando la influencia del periodo del oleaje se concluye que: los oleajes de periodos más bajos demuestran ser más agresivos, reduciendo el ancho medio final de playa seca.
- Finalmente si analizamos la influencia de la amplitud de la marea podemos concluir, comparando los casos 19, 20 y 21 que no influye en la evolución de la geometría de la línea de costa, sufriendo ésta un movimiento prácticamente paralelo a su posición original. Además también se observa que en zonas con mayor carrera de marea, el retroceso que experimenta la línea de costa es menor que en los casos con pequeñas mareas.
- Del análisis multivariable realizado también se extraen conclusiones significativas:
 - Cuando la altura de ola significativa es grande (2 m) y el periodo del oleaje es elevado (12 s) se obtienen los mayores anchos de playa seca. Nos referimos a los casos 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17 y 18. Asimismo se observa que conforme aumenta la oblicuidad del oleaje, disminuye el ancho medio de playa seca final en los casos citados. Sin embargo, para el resto de periodos y alturas de ola analizados, la direccionalidad del oleaje no parece ser un factor que tenga una influencia significativa

- Por otro lado, se observa que, en presencia de altura de ola pequeña (0.5 m), los oleajes de período largo (12 s) conducen a anchos medios de playa seca ligeramente mayores que en los casos de período corto (7 s).
- Se concluye que en los casos 10 al 18, que se corresponden con alturas de ola grandes (2 m) y períodos largos (12 s), son en los que se producen mayores ganancias de playa seca.
- Las condiciones de oleaje del caso 12 ($H_s = 2\text{ m}$, $T_p = 12\text{ s}$, amplitud de marea 2 m y oleaje normal 180°) son las más favorables, provocando un claro aumento del ancho medio de playa seca en las proximidades de la regeneración, como se observa en la Figura 4.19.
- Cuando las condiciones de oleaje son simétricas, la solución obtenida también lo es.
- En general, la ganancia (+) o pérdida (-) de volumen de playa seca no se produce de manera uniforme a lo largo del tiempo. Suele apreciarse una pérdida/ganancia cuantiosa durante los tres primeros meses y más suave o nula durante el resto del período de estudio.
- Se aprecia la formación de barras o bermas en algunos de los casos simulados, sin embargo no se ha encontrado que su formación dependa claramente de alguna de las variables de oleaje o marea analizadas.
- De la clasificación de perfiles realizada, también se extraen algunas conclusiones que se analizaron en detalle en la sección 4.3. Destacamos que, de los 108 perfiles analizados (3x36 casos), los mayores avances se obtienen con:
 - Oleajes de período 12 s.
 - Oleajes con dirección 180° .
 - Oleajes con altura de ola $H_s = 2\text{ m}$.
 - Amplitudes de marea de 2 m.

6 Recomendaciones

La idea principal de una mega-regeneración es depositar una gran cantidad de sedimento en un lugar específico de una playa y luego esperar a que las fuerzas de la naturaleza, es decir, el oleaje y las corrientes lo distribuyan. Las regeneraciones a largo plazo (mega-regeneraciones) representan una técnica muy novedosa, de hecho la primera fue construida en los Países Bajos en 2011. En consecuencia, las interacciones de las mega-regeneraciones con su entorno aún no han sido analizadas y comprendidas en detalle. Una vez concluido este trabajo, basándonos en los resultados obtenidos y teniendo en cuenta que estamos ante una técnica novedosa, se proponen las siguientes recomendaciones:

- Analizar si el uso de batimetrías diferentes a la que se ha considerado en este trabajo de fin de máster conducen a conclusiones similares o diferentes a las que se han obtenido.
- Investigar si existen geometrías iniciales para las regeneraciones que funcionen mejor en los casos en los que se detectó mayor retroceso de la línea de costa.
- Comparar los resultados obtenidos en este trabajo con los modelos analíticos existentes en la bibliografía.
- La construcción de una mega-regeneración conlleva importantes costes ambientales y económicos que no se han considerado en el desarrollo de este trabajo.
- Se propone como trabajo futuro realizar simulaciones más largas que permitan estimar la vida útil de las regeneraciones ante los diferentes casos considerados.
- Analizar detenidamente es el bloqueo de transporte de sedimentos que temporalmente podrían producir las mega-regeneraciones.

Índice de Figuras

2.1	Esquema de una regeneración. Fuente: [Waters, 2018]	3
2.2	Evolución del gasto en defensa costera en los EEUU, dependiendo del tipo de intervención - regeneración de playa (líneas y marcas rojas) y estructuras costeras (líneas y marcas azules). Fuente: Hillyer(1996)	4
2.3	cambios observados nivel medio del mar mundial. Fuente: European Enviroment Agency	5
2.4	Esquema de una draga con cabeza de corte. Fuente: [Dean, 2003]	8
2.5	Imagen bombas de reimpulsión. Fuente: http://shop.dredgecentral.com/product/booster-dredge-pump-assembly-20x18/	8
2.6	Tramos flotante y emergido de la conducción de descarga. Fuente: [Dean, 2003]	9
2.7	Lanzamiento de un chorro de mezcla sedimento-agua. Fuente: https://www.fm-middleeast.com/	10
2.8	Representación esquemática de una regeneración empleando cintas transportadoras. Fuente: [Dean, 2003]	11
2.9	Balance de masas en una rebanada. Fuente: [Ruiz, 2018]	11
2.10	Evolución de una regeneración artificial de forma rectangular sobre una playa infinitamente larga, para un oleaje incidente de 180° (normal a la línea de costa). Fuente: [Ruiz, 2018]	12
3.1	Representación 3D de la batimetría generada con Matlab	16
3.2	Dimensiones de las mallas empleadas en el modelo numérico	16
3.3	Perfil inicial. La playa emergida inicial tiene un ancho de 1000 m y una cota de 6 m sobre el nivel medio del mar	16
3.4	Perfil inicial. La playa emergida inicial tiene un ancho de 1000 m y 6 m sobre el nivel medio del mar	17
3.5	Malla nest discretizada con mapa de colores de batimetría	22
3.6	Anidado de las mallas coarse y nest	22
3.7	Anidado de las mallas coarse y nest	23
3.8	Condiciones de contorno de oleaje en la malla coarse	23
3.9	Rosa de oleaje	24
3.10	Condiciones de contorno hidrodinámicas en la malla nest	24
3.11	Variación del coeficiente de rugosidad de Chézy (C) a lo largo de la malla nest	25
3.12	Espesor del sedimento nativo y de aportación en el dominio	26
3.13	Bottom depth para diferentes tamaños de malla	27
3.14	Water depth para diferentes tamaños de malla	28
3.15	Water level para diferentes tamaños de malla	28
3.16	Bottom depth para diferentes time step	29
3.17	Water depth para diferentes time step	29
3.18	Water depth para diferentes time step	30
3.19	Water depth para diferentes time step	31
4.1	Representación 3D de la batimetría generada con Matlab	33
4.2	Posición y denominación de los perfiles que se van a analizar	34
4.3	Posición de la línea de costa después de 180 días, para los casos 19, 20 y 21	35
4.4	Posición de la línea de costa después de 360 días, para los casos 19, 20 y 21	36

4.5	Evolución de la línea de costa después de 180 días. Amplitud de marea 0.5m, altura significativa 0.5m y período pico 7s	37
4.6	Evolución de la línea de costa después de 360 días. Amplitud de marea 0.5m, altura significativa 0.5m y período pico 7s	38
4.7	Evolución de la línea de costa después de 360 días, en los casos 30, 33 y 36	39
4.8	Perfil LX-112 después de 360 días para los casos 30, 33 y 36	40
4.9	Perfil LX-150 después de 360 días para los casos 30, 33 y 36	40
4.10	Perfil LX-188 después de 360 días para los casos 30, 33 y 36	41
4.11	Evolución de la línea de costa después de 360 días, en los casos 01 y 19	42
4.12	Evolución de la línea de costa después de 180 días, en los casos 19 y 28	43
4.13	Evolución de la línea de costa después de 360 días, en los casos 19 y 28	44
4.14	Ancho medio de playa seca al final de la simulación (360 días) para diferentes valores de amplitud de marea y dirección del oleaje	46
4.15	Ancho medio de playa seca al final de la simulación (360 días) para diferentes valores de amplitud de marea y dirección del oleaje	47
4.16	Análisis multivariable para obtener el ancho medio de playa seca, considerando una altura de ola de 0.5 m y períodos de oleaje de 7 y 12 segundos. (a) representa los casos: 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26 y 27. (b) representa los casos: 01, 02, 03, 04, 05, 06, 07, 08 y 09	48
4.17	Análisis multivariable para obtener el ancho medio de playa seca, considerando una altura de ola de 2 m y períodos de oleaje de 7 y 12 segundos. (a) representa los casos: 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35 y 36. (b) representa los casos: 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17 y 18	48
4.18	Volumen de playa seca ganado (+) o perdido (-) en miles de m^3 a lo largo de toda la longitud de la playa (dominio nest) al final de la simulación, para cada uno de los 36 casos analizados	49
4.19	Evolución de la posición de la línea de costa para la simulación 12, después de 180 días (verde) y 360 días (azul)	50
4.20	Evolución de la posición y el volumen seco del perfil LX150 para el caso12 en función del tiempo	51
4.21	Evolución de la posición y el volumen seco del perfil LX150 para el caso12 en función del tiempo	52
4.22	Evolución de la posición de la línea de costa para la simulación 20, después de 180 días (verde) y 360 días (azul)	53
4.23	Evolución de la posición y el volumen seco del perfil LX150 para el caso20 en función del tiempo	54
4.24	Evolución de la posición y el volumen seco del perfil LX150 para el caso 20 en función del tiempo	55
4.25	Foreshore change classification system. Los cambios esquemáticos del perfil se muestran en rojo. Las zonas que se encuentra por debajo del Low Water o por encima del High Water se muestran planas ya que no tienen ninguna relevancia en la clasificación. Fuente: [Reeve et al., 2019]	56
4.26	Boceto de un perfil de playa en el que se muestra el avance / retroceso de los perfiles A y B. Fuente: [Reeve et al., 2019]	57
4.27	Caso 12. Perfiles LX-112, LX-150, LX-188. Se muestra el perfil inicial y final después de 360 días de simulación entre el "High Water Level" y el "Low Water Level"	57
4.28	Clasificación de perfiles de acuerdo al "Foreshore Change Classification System", mostrando en color verde los valores del FCP mayores o iguales que cero (avance o no movimiento) y en rojo los valores negativos (retroceso)	59

Índice de Tablas

2.1	Concentración límite en las arenas a aportar a playas. Fuente CEDEX	5
2.2	Valores aproximados de la capacidad de bombeo en función del tamaño del tubo de descarga. Fuente: [Dean, 2003]	9
3.1	Combinaciones de clima marítimo para cada una de las simulaciones.	18
3.2	Características de las mallas usadas en el modelo	21
3.3	Rango de condiciones de contorno de oleaje	24
3.4	Condición de contorno tipo Water Level en contorno HBC-0	24
3.5	Propiedades de los sedimentos	25
3.6	Datos análisis de sensibilidad	27
3.7	Comparación resultados para diferentes valores del factor de aceleración morfológica	30
4.1	Posibles valores de las variables independientes	34
4.2	Datos de entrada más relevantes para el análisis de la influencia de la carrera de marea.	35
4.3	Datos de entrada más relevantes para el análisis de la influencia de la dirección del oleaje	37
4.4	Datos de entrada más relevantes para el análisis de la influencia de la dirección del oleaje	39
4.5	Datos de entrada más relevantes para el análisis de la influencia del período pico.	42
4.6	Datos de entrada más relevantes para el análisis de la influencia de la carrera de marea.	43
4.7	Simulación 12. Ancho medio de playa seca para varios instantes de tiempo	50
4.8	Datos de entrada más relevantes para el análisis del caso 20	53
4.9	Simulación 20. Ancho medio de playa seca para varios instantes de tiempo	53
4.10	Clasificación perfiles de acuerdo al "Foreshore Change Classification System"	58
4.11	Ancho medio de playa seca al final del período de simulación (360 días) para las 36 simulaciones realizadas.	61

Bibliografía

- [Aleixo Pinto et al., 2018] Aleixo Pinto, C., Silveira, T., and Teixeira, S. (2018). Beach nourishment practice along the portuguese coastline: Framework and review (1950-2017) - in english.
- [Arriaga et al., 2017] Arriaga, J., Rutten, J., Ribas, F., Falqués, A., and Ruessink, G. (2017). Modeling the long-term diffusion and feeding capability of a mega-nourishment. *Coastal Engineering*.
- [Ashton and Giosan, 2011] Ashton, A. D. and Giosan, L. (2011). Wave-angle control of delta evolution. *Geophysical Research Letters*.
- [Ashton and Murray, 2006] Ashton, A. D. and Murray, A. B. (2006). High-angle wave instability and emergent shoreline shapes: 1. Modeling of sand waves, flying spits, and capes. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*.
- [Baptista et al., 2014] Baptista, P., Coelho, C., Pereira, C., Bernardes, C., and Veloso-Gomes, F. (2014). Beach morphology and shoreline evolution: Monitoring and modelling medium-term responses (portuguese nw coast study site). *Coastal Engineering*, 84:23 – 37.
- [Bergillos et al., 2018] Bergillos, R. J., López-Ruiz, A., Principal-Gómez, D., and Ortega-Sánchez, M. (2018). An integrated methodology to forecast the efficiency of nourishment strategies in eroding deltas. *Science of the Total Environment*.
- [Cai, 2019] Cai (2019). Morphodynamic Evolution and Adaptability of Nourished Beaches. *Journal of Coastal Research*.
- [de Boer et al., 2011] de Boer, W. P., Roos, P. C., Hulscher, S. J., and Stolk, A. (2011). Impact of mega-scale sand extraction on tidal dynamics in semi-enclosed basins: An idealized model study with application to the southern north sea. *Coastal Engineering*, 58(8):678 – 689.
- [de Schipper et al., 2014] de Schipper, M. A., de Vries, S., Ruessink, G., de Zeeuw, R. C., Rutten, J., van Gelder-Maas, C., and Stive, M. J. (2014). Initial spreading of a mega feeder nourishment: Observations of the sand engine pilot project. *Coastal Engineering*, 111:23 – 38.
- [Dean, 2003] Dean, R. G. (2003). *Beach Nourishment, Theory and Practice*. World Scientific Publishing Company.
- [Eric Bird, 2015] Eric Bird, N. L. (2015). *Beach Renourishment*. Springer International Publishing.
- [Hagenaars et al., 2018] Hagenaars, G., de Vries, S., Luijendijk, A. P., de Boer, W. P., and Reniers, A. J. (2018). On the accuracy of automated shoreline detection derived from satellite imagery: A case study of the sand motor mega-scale nourishment. *Coastal Engineering*, 133:113 – 125.
- [Hamza et al., 2019] Hamza, W., Tomasicchio, G. R., Ligorio, F., Lusito, L., and Francone, A. (2019). A Nourishment Performance Index for Beach Erosion / Accretion at Saadiyat Island in Abu Dhabi.
- [Huisman et al., 2018] Huisman, B., Ruessink, B., de Schipper, M., Luijendijk, A., and Stive, M. (2018). Modelling of bed sediment composition changes at the lower shoreface of the sand motor. *Coastal Engineering*, 132:33 – 49.

- [Ludka et al., 2018] Ludka, B., Guza, R., and O'Reilly, W. (2018). Nourishment evolution and impacts at four southern california beaches: A sand volume analysis. *Coastal Engineering*, 136:96 – 105.
- [Luijendijk et al., 2017] Luijendijk, A. P., Ranasinghe, R., de Schipper, M. A., Huisman, B. A., Swinkels, C. M., Walstra, D. J., and Stive, M. J. (2017). The initial morphological response of the sand engine: A process-based modelling study. *Coastal Engineering*, 119:1 – 14.
- [Nienhuis et al., 2016] Nienhuis, J. H., Ashton, A. D., Nardin, W., Fagherazzi, S., and Giosan, L. (2016). Alongshore sediment bypassing as a control on river mouth morphodynamics. *Journal of Geophysical Research F: Earth Surface*.
- [Peterson and Bishop, 2006] Peterson, C. H. and Bishop, M. J. (2006). Assessing the Environmental Impacts of Beach Nourishment. *BioScience*, 55(10):887.
- [Pila, 2018] Pila, R. G. (2018). *Hidrodinámica de arrecifes artificiales para la práctica de surf*. PhD thesis, Departamento de ingeniería aeroespacial y mecánica de fluidos. Universidad de Sevilla.
- [Ramsey et al., 2000] Ramsey, G., Carnoy, M., and Woodburne, G. (2000). Documento temático. 5:1–27.
- [Reeve et al., 2019] Reeve, D., Horrillo-Caraballo, J., Karunaratna, H., and Pan, S. (2019). A new perspective on meso-scale shoreline dynamics through data-driven analysis. *Geomorphology*.
- [Ruiz, 2018] Ruiz, A. L. (2018). Presentaciones de ingeniería de costas correspondientes a la asignatura de puertos y costas del máster universitario en ingeniería de caminos, canales y puertos. University Lecture.
- [Tonnon et al., 2018] Tonnon, P. K., Huisman, B. J., Stam, G. N., and van Rijn, L. C. (2018). Numerical modelling of erosion rates, life span and maintenance volumes of mega nourishments. *Coastal Engineering*.
- [Valsamidis et al., 2017] Valsamidis, A., Reeve, D., Cai, Y., and Dodd, N. (2017). On the morphodynamic evolution of mega-nourishments. Technical Report 186.
- [Van Der Wegen and Roelvink, 2008] Van Der Wegen, M. and Roelvink, J. A. (2008). Long-term morphodynamic evolution of a tidal embayment using a two-dimensional, process-based model. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 113(3):1–23.
- [Van Loon et al., 2017] Van Loon, A. J., Moretti, M., Tropeano, M., Acquafredda, P., Baldacconi, R., Festa, V., Lisco, S., Mastronuzzi, G., Moretti, V., and Scotti, R. (2017). Tracing the Source of the Bio/Siliciclastic Beach Sands at Rosa Marina (Apulian Coast, SE Italy). In *Sediment Provenance: Influences on Compositional Change from Source to Sink*.
- [Villatoro et al., 2014] Villatoro, M., Silva, R., Méndez, F. J., Zanuttigh, B., Pan, S., Trifonova, E., Losada, I. J., Izaguirre, C., Simmonds, D., Reeve, D. E., Mendoza, E., Martinelli, L., Formentin, S. M., Galiatsatou, P., and Eftimova, P. (2014). An approach to assess flooding and erosion risk for open beaches in a changing climate. *Coastal Engineering*, 87:50–76.
- [Waters, 2018] Waters, C. (2018). The problem with beach nourishment.